



HAL
open science

Formalisation et exploitation de connaissances et d'expériences pour l'aide à la décision dans les processus d'ingénierie système

Thierry Coudert

► To cite this version:

Thierry Coudert. Formalisation et exploitation de connaissances et d'expériences pour l'aide à la décision dans les processus d'ingénierie système. Génie des procédés. Institut National Polytechnique de Toulouse, 2014. tel-04400891

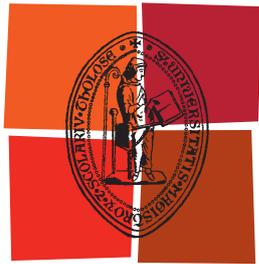
HAL Id: tel-04400891

<https://hal.science/tel-04400891v1>

Submitted on 17 Jan 2024

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.



Université
de Toulouse

Habilitation à Diriger des Recherches

de l'Université de Toulouse

délivrée par l'Institut National Polytechnique de Toulouse

soutenue le 03 octobre 2014

par

Thierry COUDERT

**Formalisation et exploitation de connaissances et
d'expériences pour l'aide à la décision dans les processus
d'ingénierie système**

Jury

Jean-Paul BOURRIÈRES - Professeur des Universités à l'Université de Bordeaux I (Président)

Abdelaziz BOURAS - Professeur des Universités à l'Université Lumière Lyon II (Rapporteur)

Maurice PILLET - Professeur des Universités à l'Université de Savoie (Rapporteur)

Damien TRENTESAUX - Professeur des Universités à l'Université de Valenciennes (Rapporteur)

Michel ALDANONDO - Professeur à l'École des Mines d'Albi (Examinateur et Correspondant)

Eric BONJOUR - Professeur des Universités à l'Université de Lorraine (Examinateur)

Laurent GENESTE - Professeur des Universités à l'École Nationale d'Ingénieurs de Tarbes (Examinateur)

Bernard GRABOT - Professeur des Universités à l'École Nationale d'Ingénieurs de Tarbes (Examinateur)

Remerciements

Ce mémoire est le fruit de treize années de travail en tant que maître de conférences, d'abord à l'Université de Bretagne Sud à Lorient, puis à l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tarbes. Je souhaite remercier ici ceux qui m'ont entouré durant ces années.

Tout d'abord, je tiens à remercier l'ensemble des membres de mon jury pour avoir accepté d'évaluer mes travaux. J'ai été très heureux de vous réunir tous les huit ce 3 octobre 2014 pour vous permettre d'écouter mon exposé et de discuter de mes travaux de recherche autour de l'ingénierie système. Cet échange a été très fructueux et il me faudra du temps pour exploiter toute l'énergie positive générée.

Je remercie en premier lieu Jean-Paul Bourrières, Professeur des Universités à l'Université de Bordeaux I pour avoir accepté de présider mon jury. Je remercie ensuite mes rapporteurs, Abdelaziz Bouras, Professeur des Universités à l'Université Lumière Lyon II, Maurice Pillet, Professeur des Universités à l'Université de Savoie et Damien Trentesaux, Professeur des Universités à l'Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis. Merci à vous trois d'avoir accepté d'évaluer mon mémoire. Je remercie également Eric Bonjour, Professeur des Universités à l'Université de Lorraine, pour avoir accepté d'examiner mes travaux. Merci à tous pour l'ensemble des précieux conseils que vous m'avez donnés.

Merci également à Bernard Grabot, Professeur des Universités à l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tarbes, pour avoir accepté de participer à mon jury. Je te remercie durant toutes ces années de m'avoir soutenu et confié des responsabilités dans le périmètres du GDR MACS et de congrès. Nul doute qu'à l'avenir, nous aurons de nouveau l'occasion de travailler efficacement ensemble et de partager.

Je remercie Michel Aldanondo, Professeur des Universités à l'Ecole des Mines d'Albi, pour avoir accepté d'être mon *correspondant d'HDR* et de participer à mon jury. Merci pour les nombreux conseils que tu m'as donnés ces dernières années, non seulement pour synthétiser mes travaux dans ce mémoire, mais aussi au fil de nos rencontres et dans les projets ANR ATLAS et FUI Hélimaintenance. En travaillant dans ton environnement, même à distance, ta bonne humeur, ta rigueur et la passion que tu voues à ton métier font qu'il est impossible de ne pas avancer, surtout devant les difficultés.

Je remercie également Laurent Geneste, Professeur des Universités à l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tarbes, le chef de mon équipe Systèmes Décisionnels et Cognitifs. Merci Laurent pour la confiance que tu m'accordes depuis de nombreuses années. Que ce soit pour l'encadrement de thèses ou l'implication dans des projets, tu m'as très souvent mis le pied à l'étrier et aidé dans la réalisation des tâches en partageant tes connaissances sans compter.

Je remercie l'ensemble des membres du LGP pour l'atmosphère agréable et studieuse qui règne dans le laboratoire. Merci aux amateurs de café *Nespresso* pour avoir installé et fait vivre un environnement sympathique et ouvert à la détente et aux discussions. Merci également aux membres du laboratoire LESTER (maintenant LAB-STICC) ainsi que de l'IUP GSI à Lorient où j'ai passé les années 2001 à 2004 pour mon premier poste de maître de conférences. J'ai appris beaucoup lors de ce rapide passage dans vos unités et j'en garde un très bon souvenir.

Enfin, mes plus chaleureux remerciements vont à ma famille. Annick et Adrien, merci de m'avoir aidé jusqu'au bout par vos encouragements et votre amour. Cela aura été sans aucun doute la meilleure aide que j'ai pu recevoir pendant tous ces mois dédiés à la rédaction.

*Je dédie ce mémoire à
Annick et Adrien*

Sommaire

Préambule	1
------------------	----------

Partie I Curriculum Vitae détaillé	3
---	----------

1	Informations générales	5
1.1	Informations personnelles	5
1.2	Titres, diplômes et déroulement de carrière	6
2	Bilan des activités d'enseignement	7
2.1	Enseignements effectués à l'IUP Génie des Systèmes Industriels (2001-2004)	7
2.2	Enseignements effectués à l'École Nationale d'Ingénieurs de Tarbes (2004- 2014)	8
3	Bilan des activités scientifiques	13
3.1	Bilan quantitatif des activités scientifiques	14
3.2	Encadrements de chercheurs	17
3.3	Responsabilités dans des projets et contrats	20
3.4	Activités d'animation de la recherche	23
3.5	Liste des publications et communications	26
4	Conclusion	32

Partie II Activités de recherche **33**

Chapitre 1 Introduction, Contexte de recherche et Problématique	35
1.1 Introduction	36
1.2 En amont de mon projet : la thèse	37
1.3 Insertion dans les activités des laboratoires	37
1.4 Problématique générale de mon activité de recherche	38
1.4.1 Le niveau Processus	38
1.4.1.1 Le point de vue pilotage	40
1.4.1.2 Le point de vue planification de projet	42
1.4.1.3 Le point de vue résolution de problèmes	44
1.4.2 Le niveau Outils	46
1.4.2.1 La reconfiguration de systèmes automatisés de production	46
1.4.2.2 La synchronisation du processus de planification de projet avec celui d'ingénierie système	47
1.4.2.3 L'optimisation multicritère guidée par les connaissances	48
1.4.2.4 L'exploitation d'expériences et de connaissances pour l'aide à la décision	50
1.4.2.5 La résolution distribuée de problèmes	52
1.4.3 Le niveau Expériences/Connaissances	53
1.4.3.1 La formalisation des expériences dans nos travaux	54
1.4.3.2 La formalisation des connaissances dans nos travaux	55
1.5 Conclusion et plan du document	58
 Chapitre 2 Reconfiguration des systèmes transitiques	 61
2.1 Introduction	62
2.2 Problématique de la reconfiguration des systèmes transitiques	62
2.3 Développements	64
2.3.1 Le Graphe d'Accessibilité Opérationnelle et la reconfiguration	64
2.3.2 La reconfiguration par l'algorithme ACO	65
2.3.3 Le système multiagent	66

2.3.4	Expérimentations et résultats	67
2.4	Conclusion	70
Chapitre 3 Planification d'un projet d'ingénierie système		71
3.1	Introduction	72
3.2	Synchronisation du processus de planification de projet avec le processus d'ingénierie système	72
3.2.1	Problématique détaillée de la synchronisation	72
3.2.2	Développements	73
3.2.2.1	Le couplage informationnel	73
3.2.2.2	Le couplage comportemental	74
3.2.3	Bilan Partiel	78
3.3	Optimisation guidée par les connaissances	79
3.3.1	Problématique détaillée de l'optimisation	79
3.3.2	Développements	81
3.3.3	Bilan Partiel des travaux en optimisation	85
3.4	Conclusion	86
Chapitre 4 Réutilisation d'acquis pour aider l'ingénierie système		87
4.1	Introduction	88
4.2	La formalisation et l'exploitation de connaissances métier	88
4.2.1	Problématique détaillée de la formalisation et de l'exploitation de connaissances métier	88
4.2.2	Développements	89
4.2.3	Bilan Partiel des travaux sur la formalisation/exploitation de connaissances métier	93
4.3	L'exploitation d'expériences guidée par les connaissances	94
4.3.1	Problématique détaillée de la réutilisation d'expériences	94
4.3.2	Développements	95
4.3.2.1	Le retour d'expérience en résolution de problèmes	95
4.3.2.2	Le retour d'expérience en conception de système	98
4.3.3	Bilan Partiel des travaux sur la formalisation/exploitation d'expériences guidée par les connaissances métier	103
4.4	L'exploitation de connaissances guidée par les expériences	105

4.4.1	Problématique détaillée de la réutilisation de connaissances guidées par les expériences	105
4.4.2	Développements	106
4.4.3	Bilan partiel de la réutilisation de connaissances guidées par les expériences	109
4.5	Conclusion	110
Chapitre 5 La résolution distribuée de problèmes		111
5.1	Introduction	112
5.2	Problématique de la résolution distribuée	112
5.3	Développements	113
5.3.1	Vers un processus distribué de résolution de problèmes	114
5.3.2	Les modèles <i>Technical Breakdown Structure</i> et <i>Collaborative Breakdown Structure</i>	116
5.3.3	Les outils d'aide à la résolution distribuée	117
5.4	Conclusion	119
Chapitre 6 Conclusion et projet de recherche		121
6.1	Synthèse des chapitres	122
6.2	Projet de recherche	128
6.2.1	Les projets en cours	128
6.2.2	Développement de mon projet de recherche	129
6.2.2.1	L'aide à la décision pour la gestion des risques en ingénierie système	130
6.2.2.2	L'amélioration des processus de résolution de problèmes	133
6.2.2.3	Optimisation de l'association Acteurs / Activités basée sur le retour d'expérience des contributions	135
6.2.2.4	La réutilisation d'expériences guidée par les connaissances	137
6.2.3	Conclusion sur mon projet de recherche	139
Bibliographie		141

Préambule

Ce manuscrit d'habilitation à diriger des recherches synthétise mon activité professionnelle en enseignement et en recherche depuis l'obtention de mon poste de maître de conférences en 2001. Après l'obtention de mon diplôme de doctorat, préparé au Laboratoire Génie de Production (LGP) entre 1997 et 2000 sous la direction de Bernard Grabot, j'ai obtenu mon poste de maître de conférences à l'Université de Bretagne Sud à Lorient (UBS). Durant une période de trois années dans cette université et au Laboratoire d'Electronique des Systèmes Temps Réels (LESTER devenu LAB-STICC par la suite), j'ai pu développer des activités de recherche dans le domaine de la conception et de la reconfiguration des systèmes automatisés de type *Systèmes Transitiqes*. Suite à ma mutation à l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tarbes en 2004, j'ai poursuivi mes activités de recherche au Laboratoire Génie de Production (LGP) en lien avec le développement d'outils d'aide à la décision dans les processus d'ingénierie système basés sur l'exploitation de connaissances et d'expériences. En enseignement, depuis 2001, mes activités sont partagées entre le génie industriel et l'informatique.

Ce document est structuré en deux parties :

1. la première partie permet d'exposer, dans mon Curriculum Vitae détaillé, un bilan de mes activités d'enseignant-chercheur. Mon parcours professionnel, mes activités d'enseignement et un bilan de mes activités de recherche sont exposés de manière synthétique. Dans un premier temps, les enseignements dont j'ai eu la responsabilité (conception et ou réalisation) ainsi que les documents pédagogiques produits et les volumes horaires sont exposés. Ensuite, les encadrements de chercheurs (doctorants, masters et post-doctorat), les projets institutionnels (FUI et ANR) dans lesquels j'ai pris des responsabilités, les partenariats avec des entreprises dans le cadre de contrats CIFRE, mes activités d'animation de la recherche au niveau national et international font partie de ce bilan. Cette section se termine par la liste exhaustive de mes publications et communications (section 3.5) réalisées depuis le début de mon activité de chercheur, en 1997,
2. la seconde partie synthétise mes activités de recherche réalisées depuis 2001. Cette seconde partie est présentée selon 6 chapitres. Le chapitre 1 permet d'exposer la problématique globale de mes travaux de recherche. Elle est orientée par un modèle à trois niveaux (*Processus, Outils, Expériences / Connaissances*) et étayée par un premier niveau d'étude bibliographique. Le niveau de détail choisi permet de comprendre cette problématique dans sa globalité. Les processus ciblés, les outils développés, les connaissances exploitées sont présentés au regard de la littérature dans les différents domaines. Les chapitres 2 à 5 fournissent quant à eux un niveau de détail plus fin. Ils permettent de présenter les problématiques de manière affinée, les développements réalisés et les contributions scientifiques majeures. L'objectif est de fournir des éléments qui soient utiles à la compréhension de mon activité de recherche mais, également, d'en favoriser l'exploitation ultérieure. Enfin, dans le chapitre 6, la conclusion permet de prendre le recul nécessaire aux travaux réalisés et de proposer mon projet de recherche pour les années à venir.

Première partie
Curriculum Vitae détaillé

1 Informations générales

1.1 Informations personnelles

État civil

Thierry Coudert
Né le 07 décembre 1970 à Neuvic sur l'Isle (Dordogne) - 43 ans
Pacsé, 1 enfant né en 2006

Adresse personnelle

51, rue Emile Guichenné, 64000 Pau

Adresse professionnelle

Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tarbes - ENIT
Laboratoire Génie de Production (LGP)
Equipe Systèmes Décisionnels et Cognitifs (SDC)
47, avenue d'Azereix
BP 1629
65016 Tarbes Cedex
Telephone : 05 62 44 50 89
Mèl : thierry.coudert@enit.fr

Situation professionnelle actuelle

Maître de conférences à l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tarbes (ENIT)
Section CNU : 61
Laboratoire de recherche : Laboratoire Génie de Production (LGP)
Equipe Systèmes Décisionnels et cognitifs (SDC)
Échelon : 6^{ème} échelon de la classe normale des maîtres de conférence depuis le 01/03/2012.

Mots clés

Enseignement : Génie Industriel, Gestion de Production, Modélisation d'Entreprise, Informatique, Bases de Données, Langage C, Systèmes Multi-Agents

Recherche : Ingénierie système, Optimisation Multicritère, Planification, Ordonnancement, Gestion de Projet, Raisonnement à Partir de Cas, Ingénierie des Connaissances, Retour d'expérience, Résolution de Problèmes, Amélioration Continue

1.2 Titres, diplômes et déroulement de carrière

La liste des titres et des diplômes que j'ai obtenus depuis 1988 est synthétisée ci-dessous :

- 2000** Doctorat en Systèmes Industriels de l'Institut National Polytechnique de Toulouse (INPT), Laboratoire Génie de Production de l'École Nationale d'Ingénieurs de Tarbes, Titre : *Apport des systèmes multi-agents pour la négociation en ordonnancement : application aux fonctions production et maintenance*, Soutenue le 15/12/2000.
- 1997** DEA Automatique et productique (option Productique), Université de Bordeaux I, Laboratoire LAPS-GRAI, Titre : *Conduite multi-niveaux des systèmes de production : généralisation des notions de capacité et de charge*
- 1995** (*Service national, Fontainebleau*)
- 1994** Maîtrise EEA, Université de Pau et des Pays de l'Adour
- 1993** Licence Électronique, Électrotechnique et Automatique (EEA), Université de Pau et des Pays de l'Adour
- 1992** DEUG A SPI (sciences Physiques pour l'Ingénieur), Université de Pau et des Pays de l'Adour
- 1989** APIDS (Année Préparatoire à l'Insertion dans les DEUG scientifiques), Université de Pau et des Pays de l'Adour (UPPA)
- 1988** Baccalauréat Technologique F3 (spécialité électrotechnique), Lycée Albert Claveille (Périgueux)

Mon parcours professionnel est synthétisé ci-dessous :

- 2004-2014** Maître de conférences à l'École Nationale d'Ingénieurs de Tarbes, Laboratoire Génie de Production
- Sept. 2004** Mutation à l'École Nationale d'Ingénieurs de Tarbes, Laboratoire Génie de Production
- 2001-2004** Maître de conférences, Université de Bretagne Sud – IUP de Lorient – Laboratoire d'Électronique des Systèmes Temps Réels (ancien LESTER devenu LAB-STICC)
- 2000-2001** ATER Temps complet, École Nationale d'Ingénieurs de Tarbes, Laboratoire Génie de Production)
- 1997-2000** Doctorant, École Nationale d'Ingénieurs de Tarbes, Laboratoire Génie de Production)

Ma carrière d'enseignant chercheur a débuté en 1997 à l'École Nationale d'Ingénieurs de Tarbes et au sein du Laboratoire Génie de Production lors de mes études de doctorat. Ensuite, après un poste d'attaché temporaire à l'enseignement et à la recherche (ATER) et l'inscription sur la liste de qualification aux fonctions de Maître de Conférences en 61^{ème} section CNU, j'ai obtenu mon premier poste de maître de conférences en 2001 à l'Université de Bretagne Sud à Lorient. J'ai effectué mon activité d'enseignement à l'IUP Génie des Systèmes Industriels (Niveau L1, M1 et M2) et mon activité de

recherche au sein du Laboratoire d'Électronique des Systèmes Temps Réels (LESTER, devenu par la suite LAB-STICC) dans l'équipe Contrôle Commande des Systèmes Reconfigurables. En septembre 2004, j'ai obtenu ma mutation à l'École Nationale d'Ingénieurs de Tarbes pour le poste de maître de conférences que j'occupe actuellement. Ainsi, depuis 2001, mon activité professionnelle est partagée entre des activités à caractère pédagogique et des activités à caractère scientifique. Ces deux activités sont décrites dans la section 2 et la section 3.

2 Bilan des activités d'enseignement

Depuis 2001, mes activités d'enseignement se sont partagées entre l'Institut Universitaire Professionnalisé Génie des Systèmes Industriels à Lorient entre 2001 et 2004 et l'École Nationale d'Ingénieurs de Tarbes entre 2004 et 2014. Les deux sections suivantes synthétisent mes activités dans ces établissements.

2.1 Enseignements effectués à l'IUP Génie des Systèmes Industriels (2001-2004)

Les matières enseignées, leur contenu, le niveau des étudiants concernés et le volume horaire global sont résumés dans la table 1).

En outre, durant ces trois années à Lorient, j'ai eu en charge les activités suivantes :

- la responsabilité des projets et des stages : de 2001 à 2004, cette activité a consisté à organiser les projets et les stages : présentation des projets aux étudiants, planification des soutenances, affectation des tuteurs de projets et de stage, organisation et planification des soutenances avec les enseignants et les responsables entreprises ;
- la direction des études du DESS Gestion et Pilotage de la Production : en 2002, le DESS GPP, ouvert à un public de formation continue depuis 1998, s'est ouvert à un public de formation initiale en conservant le principe d'alternance (trois semaines en entreprise et une semaine d'enseignements). J'ai donc eu pour mission d'organiser la première rentrée en 2002 : publicité, définition du contenu des dossiers de candidature, gestion des dossiers (envoi, sélection, entretiens, etc.). Ensuite, j'ai eu à organiser les études de 8 étudiants de formation initiale (conception/saisie des emplois du temps, organisation des devoirs, coordination avec les intervenants extérieurs qui constituaient 50% des enseignants) ;
- la direction des études de la Maîtrise Génie des Systèmes Industriels : cette mission m'a été confiée pour l'année 2003-2004. J'ai eu à organiser l'année d'études de la maîtrise GSI (50 étudiants). Cette mission comprenait l'organisation (et la saisie) des emplois du temps, l'organisation des devoirs, la communication des notes, la planification des intervenants extérieurs (20% des enseignants). Cette mission comportait également une forte part de communication avec les étudiants pour gérer les problèmes individuels.

Matière	Contenu	Niveau	Horaire
Organisation et Gestion de Production (OGP)	Ce cours présente les données techniques, les fonctions de MRP II, l'ordonnancement, le juste-à-temps (méthode Kanban), la gestion des stocks et l'implantation d'ERP. Le cours (20 H) est complété par 10 H de travaux dirigés et d'un TP (jeu du kanban). Public : 50 étudiants de licence, 25 en TD, 12 en TP. Documents pédagogiques conçus : OGP, 73 pages.	L3	80H/an
Maintenance	Ce cours présente des méthodes permettant d'optimiser la maintenance préventive par une analyse statistico-économique, les analyses AMDEC en maintenance et enfin la méthode TPM (Totale Productive Maintenance). Le cours (10 H) est complété par des TD (4 H) et par un TP (4 H). Public : 50 étudiants de maîtrise, 25 étudiants en TD, 12 étudiants en TP / 16 étudiants en DESS Documents pédagogiques conçus : Maintenance, 52 pages.	M1, M2	40H/an
Réseaux Locaux Industriels	Mise en place de TP de RLI (12 H) et de Supervision (12 H) avec d'autres enseignants. Développement d'applications distribuées sur automates Télémécanique. Public : 12 étudiants de maîtrise GSI par groupe de TP.	M1	25H/an
Sûreté de fonctionnement	Participation aux TD (8 H) et TP (8 H) de sûreté de fonctionnement. Calcul des indicateurs de sûreté de fonctionnement (Fiabilité, MTTF, MTBF, Disponibilité, etc.). Utilisation des chaînes de Markov. Public : 25 étudiants maîtrise GSI en TD, 12 étudiants par TP.	M1	25H/an
Recherche Opérationnelle (RO)	Participation aux TD (12 H) et TP (12 H) de recherche opérationnelle. Méthode du simplexe pour la planification et l'ordonnancement ; Maximisation de flots dans des graphes. Les étudiants utilisent le logiciel Visual X-Press en TP. Public : 25 étudiants Licence GSI en TD, 12 étudiants par TP.	L3	25H/an

TABLE 1 – Synthèse de mes enseignements à l'IUP GSI de Lorient

2.2 Enseignements effectués à l'École Nationale d'Ingénieurs de Tarbes (2004-2014)

Le diagramme suivant (Figure 1) illustre sous forme synthétique mes enseignements réalisés à l'ENIT, avec le volume horaire, durant les dix dernières années (2004-2014). Ces enseignements se partagent entre l'informatique (Langage C, Bases de données, Systèmes Multi-Agents) et le génie industriel (Méthode GRAI, Outils du Génie Industriel, Gestion de production). Le niveau du public concerné est réparti sur tous les niveaux du L1 au M2. Le types d'enseignements que j'ai réalisés sont des cours, des travaux dirigés et des travaux pratiques pour l'ensemble des niveaux.

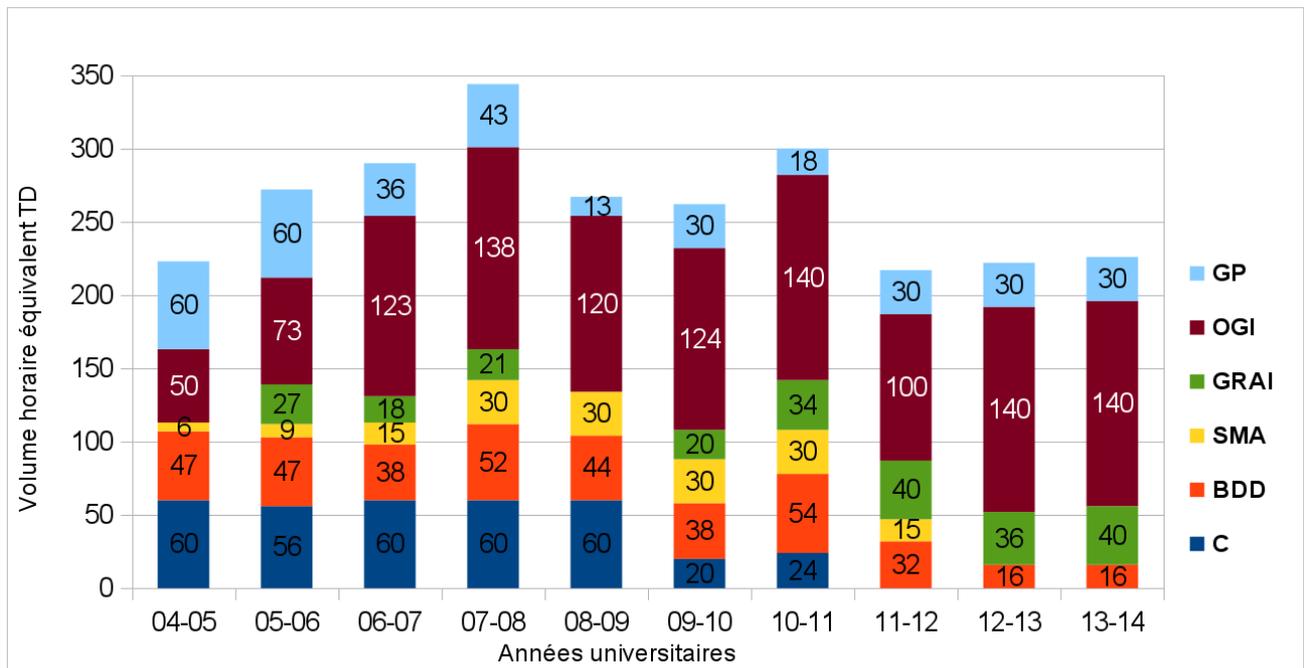


FIGURE 1 – Synthèse de mes enseignements à IÉNIT entre 2004 et 2014

Le descriptif des enseignements réalisés est fourni dans les tableaux suivants (Table 2 et Table 3) avec le niveau des étudiants concernés, le volume horaire et le type d'enseignement (cours, Travaux Dirigés, Travaux Pratiques). Le titre et le volume des documents pédagogiques (supports de cours) que j'ai réalisés seul ou en collaboration avec d'autres enseignants sont également représentés. La table 2 synthétise les enseignements d'informatique (Langage C, Bases de données et Systèmes Multi-Agents). La table 3 synthétise ceux de Génie Industriel (Gestion de production, Outils du Génie Industriel, Méthode GRAI).

Matière	Contenu	Niveau
Langage C	<p>Cet enseignement présente les concepts d'algorithmique et du langage de programmation C. Chaque notion abordée en cours est immédiatement appliquée en travaux pratiques de langage C.</p> <p>Public : 24 étudiants de 5^{ème} semestre ENIT Admis Sur Titre (2004-2011), 24H de cours et 24H de TP par étudiant.</p> <p>Documents pédagogiques conçus (en collaboration avec d'autres enseignants) : Algorithmique et langage C, support de cours, 30 pages.</p>	L3
Bases de données (BDD)	<p>Cet enseignement complète le cours et présente de manière appliquée les techniques de conception et de gestion de bases de données (modèle entité association, relationnel, requêtes en SQL, algèbre relationnelle). Le logiciel MySQL est utilisé.</p> <p>Public : 24 étudiants de 3^{ème} semestre ENIT par groupe, 16H TD par étudiant par semestre.</p> <p>Documents pédagogiques conçus : Langage SQL pour la sélection, support de TD, 20 pages.</p>	L2
Systèmes Multi-Agents (SMA)	<p>Cet enseignement permet d'initier les étudiants de dernière année de l'ENIT aux techniques de type SMA. Le cours présente les agents (réactifs, cognitifs), les systèmes multiagents, l'architecture de subsomption et l'architecture BDI, les modes de coopération, les langages KQML et FIPA-ACL pour la communication ainsi que des applications de ces systèmes. Le cours théorique (6H) est complété par un TD (6H) sur une plate-forme multiagent (protocole contract net pour la coopération).</p> <p>Public : 20 étudiants de dernière année ENIT, 6H de cours et 6H de TD par étudiant par semestre.</p> <p>Documents pédagogiques conçus : Les systèmes multi-agents pour l'ingénieur, support de cours – 100 pages.</p>	M2

TABLE 2 – Synthèse de mes enseignements à l'ENIT en informatique

Matière	Contenu	Niveau
Gestion de Production (GP1)	Ce cours présente les généralités sur les systèmes de production dans les entreprises, les données techniques, l'enchaînement des fonctions de MRP II, l'ordonnancement et les méthodes d'implantation. Le cours est complété par des travaux dirigés. Public : 90 étudiants de troisième année ENIT (2004-2008), 6H de cours et 12H de TD par étudiant par semestre. Documents pédagogiques conçus : Gestion de Production, support de cours, 120 pages	L3
Gestion de Production (GP2)	Ce cours présente la gestion des stocks, les techniques d'implantation de moyens de production, les techniques d'ordonnancement de production et de prévisions. Le cours est complété par des travaux dirigés. Public : 30 étudiants apprentis ENIT (2008-2014), 15H de cours et 15H de TD par étudiant par semestre. Documents pédagogiques conçus : Gestion de Production, support de cours, 30 pages.	L3
Modélisation d'entreprise : Méthode GRAI (GRAI)	Cet enseignement présente le modèle GRAI pour la modélisation d'un système décisionnel pour une entreprise de production de biens ou de services. Les notions d'horizons et de périodes sont définis ainsi que la construction d'une grille GRAI pour l'analyse et la conception d'un système décisionnel. Public : 40 étudiants en dernier semestre ENIT (2005-2014), 8H de cours et 4H de TD par étudiant par semestre. Documents pédagogiques conçus : Modélisation d'entreprise : la méthode GRAI, support de cours, 60 pages.	M2
Outils du Génie Industriel (OGI)	Ce cours s'adresse aux étudiants de première année de l'ENIT. Le but est de leur présenter, en guise d'initiation, quelques outils couramment employés en génie industriel (Méthode du simplexe, SADT, Réseaux, Amélioration continue, diagrammes de Gantt). Public : 160 étudiants de premier semestre ENIT (2004-2014), 8H de cours, 2H de TD, 4H de TP par étudiant. Documents pédagogiques conçus : Outils du génie industriel, support de cours, 70 pages.	L1

TABLE 3 – Synthèse de mes enseignements à l'ENIT en Génie Industriel (GI)

En outre, depuis septembre 2013, je participe au groupe de travail pour l'**Accompagnement Méthodologique et Individualisé (AMI)** dont le rôle est de rencontrer, lors d'entretiens individuels ou en groupe, des étudiants en difficultés scolaire afin d'analyser avec eux les causes d'échec et tenter d'améliorer leurs méthodes de travail. Cette activité est réalisée avec des étudiants des semestres 1 et 2 de l'ENIT (première année). Elle nécessite environ 4 demi-journées par semestre.

Encadrement de stagiaires : Parallèlement, j'encadre chaque année des stagiaires de formation initiale ou continue (filière par apprentissage ouverte depuis 2008 à l'ENIT). Sur les cinq dernières années, j'ai encadré sept stagiaires apprentis durant leurs trois années d'apprentissage ainsi qu'un stagiaire de formation initiale (stage de semestre 3).

Je participe également au **groupe de travail ENT** (Environnement Numérique de Travail) en tant que représentant de la DFVE (Direction de la Formation et de la Vie Etudiante) depuis 2011. Ce groupe de travail est chargé d'étudier et formaliser les besoins de l'ENIT dans le domaine des technologies de l'information et de la communication afin de guider les choix de développement, d'installation et d'achat d'outils dédiés.

Intervention extérieure à l'ENIT : En parallèle de ces enseignements et depuis 2008, je réalise une intervention en gestion de production pour un volume de 30 heures par an en Master 2 Matériaux à l'Université de Pau et des Pays de l'Adour (UPPA). Ce cours présente les généralités sur les systèmes de production dans les entreprises, les données techniques, l'enchaînement des fonctions de MRP II, l'ordonnancement, le juste-à-temps (méthode Kanban) et les méthodes d'implantation. Le cours est complété par des travaux dirigés selon la répartition suivante : 15 H de cours et 15 H de TD. Le public concerné est constitué d'une douzaine d'étudiants de M2 Matériaux chaque année.

Dans la section suivante, un bilan de mes activités scientifiques réalisées depuis 2001 est décrit.

3 Bilan des activités scientifiques

Suite à mes études de DEA (96-97) et de thèse de doctorat (97-2000), mon activité scientifique s'est progressivement construite durant la période 2001-2014. De manière globale, mes activités sont articulées autour de la formalisation et l'exploitation conjointe d'expériences et de connaissances pour la définition et la mise en œuvre d'outils d'aide à la réalisation des activités d'un processus d'ingénierie système.

Ces outils consistent en des mécanismes intégrés d'aide à la décision basés sur des techniques d'intelligence artificielle exploitant conjointement expériences et connaissances. L'objectif global de mes travaux est d'aider les utilisateurs en ingénierie système, au plus tôt dans les processus, à réaliser des choix opportuns, le cas échéant optimaux, guidés par les connaissances et en favorisant la réutilisation d'expériences passées. Cette description globale de mon activité est présentée de manière détaillée dans la partie 2 de ce mémoire. Au sein de cette section, mon activité de recherche est présentée de manière globale en faisant un bilan selon trois axes fortement corrélés :

- **l'encadrement de chercheurs** de type master, doctorant et post-doc en validant leurs travaux par la rédaction de publications dans des revues internationales à comité de lecture ainsi que de communications dans des congrès nationaux et internationaux ;
- les **responsabilités de projets et de contrats** au sein de projets nationaux labellisés par le pôle de compétitivité Aerospace Valley. Il s'agit de projets financés par l'état et/ou les régions de type ANR RNTL et FUI. Cette activité passe notamment par le co-encadrement de thèses en contrats CIFRE avec des entreprises et/ou avec le laboratoire CGI de l'Ecole des Mines d'Albi ;
- les **responsabilités d'animation de la recherche** au niveau national et international. Il s'agit de participations à des jurys de thèse en tant qu'examinateur ou à des comités de sélection pour le recrutement d'enseignant-chercheurs, d'activités au sein de comités d'organisation et/ou de programme de congrès scientifiques ou d'activités de relecture dans des revues scientifiques à comité de lecture, .

Ainsi, l'ensemble de ces activités est synthétisé dans les sections suivantes. Dans la section 3.1, un bilan quantitatif de mon activité de recherche selon les trois axes est dressé. Ensuite, dans la section 3.2, mes activités de coencadrement de chercheurs est détaillée. La section 3.3 permet de décrire mes responsabilités scientifiques en lien avec les projets contractuels. La section 3.4 illustre mes activités d'animation de la recherche et, enfin, la liste de mes publications et communications est donnée en section 3.5.

3.1 Bilan quantitatif des activités scientifiques

Mes activités scientifiques réalisées durant le déroulement de mon activité de recherche depuis 2001 sont synthétisées de manière quantitative dans les tableaux suivants. Les catégories d'activités, les indicateurs associés ainsi que les références aux sections descriptives du mémoire sont représentés. Le bilan des publications et communications est représenté dans la table 4). Pour les publications, les bases dans lesquelles elles sont référencées sont indiquées. Par exemple, n [scopus et isi-wos*] signifie que n articles sont référencés à la fois dans la base SCOPUS et dans la base ISI-Web of Knowledge de Thomson-Reuters. La liste de ces publications et communications est donnée dans la section 3.5, page 26.

Catégorie d'article	Indicateur
Articles dans des revues scientifiques à comité de lecture	Total : 11, dont : 7 [scopus et isi-wos*] ; 2 [scopus]
Éditorial de revue scientifique internationale avec comité de lecture	1 [scopus et isi-wos*]
Communications internationales avec comité de lecture et actes édités	30
Communications nationales avec comité de lecture et actes édités	14
Communications nationales sans actes édités	3
Articles dans des revues scientifiques électroniques	1

TABLE 4 – Bilan de mes publications et communications

Encadrement de chercheurs : mes activités d'encadrement de chercheurs réalisées depuis 2001 sont synthétisées dans la table 5. Les dates de soutenance des thèses ainsi que les pourcentages d'encadrements sont représentés. De plus, dans la section 3.2, page 19, la figure 5 illustre la chronologie de ces encadrements.

Catégorie	Indicateur
Thèses soutenues	4 (mai 2009, juillet 2011, février 2013, décembre 2013)
Pourcentages d'encadrement	60 % ; 30 % ; 30 % ; 50 % (total de 170 %)
DEA ou Master recherche (100 % de l'encadrement)	5 (dont 1 en cours)
Chercheur post-doctorat (contrat de 2 ans)	1 (en cours sur la période 2013-2015) Pourcentage d'encadrement : 70%

TABLE 5 – Bilan de l'encadrements de chercheurs

Responsabilités dans des projets : les projets dans lesquels j'ai eu des responsabilités scientifiques sont synthétisés dans la table 6.

Catégorie	Indicateur
Responsabilité d'un lot de travail dans un projet ANR	1 projet : → ANR ATLAS
Responsabilités dans des projets FUI	2 projets : → FUI Hélimaintenance → FUI 2PI-MCO
Coresponsabilités de contrats CIFRE	2 thèses CIFRE : → Joël ABEILLE → Juan ROMERO

TABLE 6 – Bilan des responsabilités dans des projets et contrats

Animation de la recherche : la table 7 dresse un bilan quantitatif de mes activités d’animation de la recherche. Ces activités sont détaillées dans la section 3.4, page 23. En outre, la dernière ligne donne le bilan des prix de type « Best paper Award » que j’ai obtenu avec mes co-auteurs.

Catégorie	Indicateur	Détails
Participation à des comités de sélection	2	→ ENIT en 2010 ; → ENSEEIHT en 2010
Participation à des commissions de spécialistes 61 ^{ème} section CNU	2	→ Université de Bretagne Sud – Elu Suppléant (2003-2004) ; → Université Paul Sabatier – Membre extérieur (2004-2009).
Participations à des jurys de thèse en tant que membre extérieur (examineur)	2	→ LAAS-CNRS en 2007 ; → Centre de Génie Industriel de l’École des Mines d’Albi en 2010
Participation à des comités de programme de conférences nationales ou internationales	5	JDMACS’09, CIGI’11, JDMACS’11, JDMACS’13, IEEM’13
Participation à des comités d’organisation de conférences nationales ou internationales	4	EDSYS’06, JDMACS’07, JDMACS’09, CIGI’09
Organisation de sessions spéciales	3	MOSIM’10, CIGI’11, INCOM’12
Invitations à présider des sessions dans des conférences nationales ou internationales	2	CIGI’09, IEEM’12
Relecteur pour des revues internationales	5 revues	JESA, IJPR, EAAI, AI-EDAM, CERA
« Best paper Award »	4 (dont 2 IEEE et 1 IFAC)	IEEM’10, INCOM’12, ECIME’12, IEEM’13

TABLE 7 – Synthèse de mes activités d’animation de la recherche

3.2 Encadrements de chercheurs

Les travaux des chercheurs pour lesquels j'ai eu la responsabilité d'un co-encadrement concernent cinq DEA (ou Masters Recherche), quatre thèses et un post-doc.

Thèses encadrées :

- 1. Paul PITIOT (PhD.1),** *Amélioration des techniques d'optimisation combinatoire par utilisation d'un mécanisme de retour d'expérience : Application à la sélection de scénarios en conception préliminaire de produit / projet*
Financement : Bourse de l'école doctorale Aéronautique Astronautique.
Pourcentage d'encadrement : 60 %
Co-encadrants : Laurent Geneste (Directeur de thèse, LGP-ENIT) 20 %, Claude BARON (co-directrice, LATTIS-INSA), 20 %.
Thèse soutenue le 25/05/2009
Durée : 42 mois
Qualifié sur la liste des maîtres de conférences en 61^{ème} section CNU en 2009.
Poste actuel : Enseignant chercheur depuis 2009 – Enseignant à l'école 3IL, antenne de Rodez – Chercheur associé au laboratoire CGI de l'École des mines d'Albi.
- 2. Joël ABEILLE (PhD.2),** *Vers un couplage des processus de conception de systèmes et de planification de projet : formalisation de connaissances méthodologiques et de connaissances métier,* Ecole doctorale Systèmes.
Financement : Bourse CIFRE en partenariat avec l'entreprise PULSAR INNOVATION à Toulouse.
Pourcentage d'encadrement : 30 %
Co-encadrants : Laurent Geneste (Directeur de thèse, LGP-ENIT) 20 %, Michel ALDANONDO (codirecteur de thèse, CGI - Ecole des mines d'Albi) 20 %, Elise Vareilles (CGI-Ecole des mines d'Albi), 30 %.
Thèse soutenue le 06/07/2011.
Durée : 42 mois
Poste actuel : Ingénieur R&D chez Sud Ingénierie à Colomiers depuis 2012.
- 3. Aurélien CODET DE BOISSE (PhD.3),** *Aide à la décision en maintenance d'hélicoptères civils par l'exploitation de connaissances capitalisées : couplage des approches CSP et CBR,* École doctorale Systèmes.
Financement : projet FUI Helimaintenance
Pourcentage d'encadrement : 30 %
Co-encadrants : Michel ALDANONDO (Directeur de thèse, CGI-Ecole des mines d'Albi) 20 %, Laurent GENESTE (codirecteur de thèse, LGP-ENIT) 20 %, Élise VAREILLES (CGI-Ecole des mines d'Albi), 30 %.
Thèse soutenue le 05/02/2013.
Durée : 38 mois
Poste actuel : Directeur de la société InteropSys depuis 2013.

4. **Juan ROMERO** (PhD.4), *Collaborative Problem Solving Within Supply Chains : General Framework, Process and Methodology*, École doctorale Systèmes.
Financement : Bourse CIFRE en partenariat avec l'entreprise AXSENS BTE à Toulouse.
Pourcentage d'encadrement : 50 % (co-direction avec Laurent GENESTE)
Co-encadrants : Laurent GENESTE (Directeur de thèse, LGP-ENIT) 50 %.
Thèse soutenue le 03/12/2013.
Durée : 37 mois
Poste actuel : Consultant en Chaînes logistiques chez AXSENS-BTE – Responsable du pôle Recherche de l'entreprise.

DEA/Master Recherche encadrés :

1. **Mohcen BENLAGHA** (M2R.1), *Contrôle/Commande de systèmes automatisés par une approche agent*, Mémoire de DEA de l'Université de Bretagne Sud, Laboratoire LESTER, **septembre 2003**.
Pourcentage d'encadrement : 100 %
Poste actuel : Ingénieur chez Orascom Telecom depuis 2005.
2. **Paul PITIOT** (M2R.2), *Spécifications d'un système basé sur le logiciel d'ordonnancement CAD-Plan dans un contexte d'aide à la décision et d'ordonnancement distribué*, Mémoire de Master 2 Recherche SAID, École doctorale Systèmes, ENIT, Laboratoire LGP, **juin 2005**.
Pourcentage d'encadrement : 100 %
Poste actuel : Docteur de l'INPT, Enseignant chercheur – Enseignant à l'école 3IL, antenne de Rodez – Chercheur associé au laboratoire CGI de l'école des mines d'Albi.
3. **Céline BOITTE** (M2R.3), *Étude d'un module de réutilisation de cas dans le contexte du projet RNTL ATLAS*, Mémoire de Master 2 Recherche SAID, Ecole doctorale Systèmes, ENIT, Laboratoire LGP, **février 2009**.
Pourcentage d'encadrement : 100 %
Poste actuel : Ingénieur aéronautique chez Airbus
4. **Juan ROMERO** (M2R.4), *Étude d'un module de Réutilisation de cas en utilisant le formalisme des Graphes Conceptuels dans le contexte du projet ANR ATLAS*, Mémoire de Master 2 recherche SAID, École doctorale Systèmes, ENIT, Laboratoire LGP, **juin 2010**.
Pourcentage d'encadrement : 100 %
Poste actuel : Docteur de l'INPT, Consultant en Chaînes logistiques chez AXSENS-BTE – Responsable du pôle Recherche.
5. **Pablo BAROSO** (M2R.5), *Study of Ant Colony Optimization algorithm for the multi-objective optimization of the coupled project planning / product design processes taking into account risk*, Research Project Semester, Collaboration avec l'université de Rosario, Argentine, **septembre 2014** (en cours).
Pourcentage d'encadrement : 100 %

Post-Doc encadré :

1. **Éric VILLENEUVE** (PostDoc.1), *Activité de recherche dans le projet FUI 2PI-MCO, Formalisation et exploitation de connaissances et d'expériences dans le but d'optimiser un processus de réponse à appels d'offre dans le cadre de la conception de solutions de câblage – Application au domaine du lavage industriel.*
 Financement : Projet FUI 2PI-MCO
 Pourcentage d'encadrement : 100 %
 Durée du contrat : 24 mois (du 01/12/2013 au 31/11/2015).

L'ensemble de leurs travaux est illustré de façon chronologique sur la figure 2. Associées à ces encadrements, les responsabilités scientifiques que j'ai eu à assurer sont détaillées dans la section suivante.

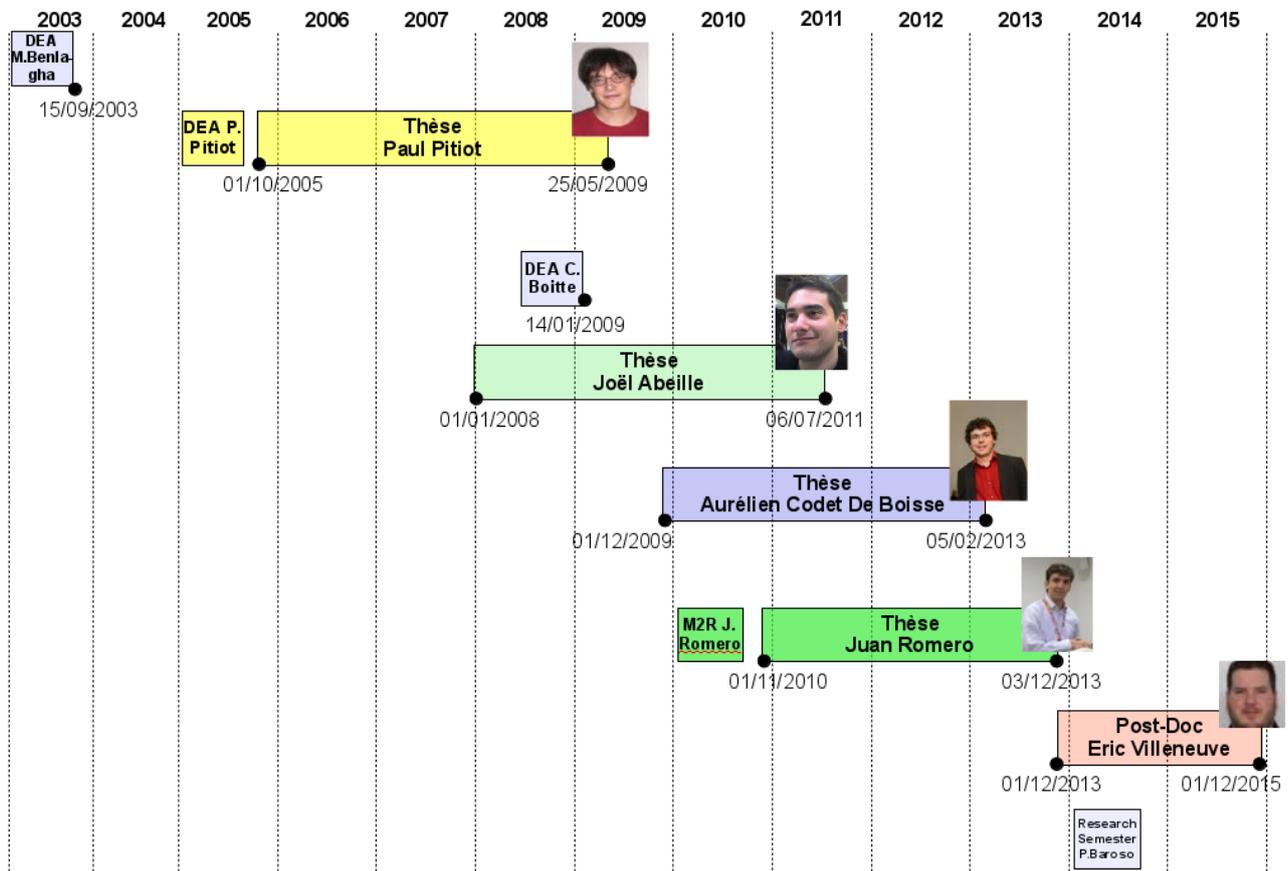


FIGURE 2 – Chronogramme des encadrements de chercheurs

3.3 Responsabilités dans des projets et contrats

Projet ANR ATLAS (*Aides et assistances pour la conception, la conduite et leur couplage par les connaissances*)

Le projet ANR ATLAS s'est déroulé entre 2008 et 2011. Il s'agit d'un projet RNTL financé par l'Agence Nationale pour la Recherche et labellisé par le pôle de compétitivité Aerospace Valley. Le consortium impliqué dans ce projet comportait cinq laboratoires de recherche (CGI - Ecole des Mines d'Albi, INSA-LATTIS Toulouse, IMS-LAPS Bordeaux, LGP-ENIT Tarbes et LAAS-CNRS Toulouse) et deux industriels (PULSAR INNOVATION et SIGMA PLUS situées à Toulouse). Il était piloté par le Centre de Génie Industriel de l'Ecole des Mines d'Albi. L'objectif global du projet était de développer un démonstrateur logiciel mettant en œuvre le couplage entre les processus de conception de systèmes et de planification du projet de conception. La thèse CIFRE de Joël Abeille en codirection LGP/CGI a permis de spécifier le besoin en lien direct avec des industriels du pôle Aerospace Valley et de proposer des modèles et des processus permettant l'intégration de la conception de systèmes avec la planification de projet. Au sein de ce projet, j'ai eu les responsabilités scientifiques suivantes :

- la responsabilité scientifique du lot de travail WP1 ;
- le co-encadrement de la thèse CIFRE de Joël ABEILLE ;
- l'encadrement des Master recherche de Céline BOITTE et de Juan ROMERO.
- la participation en tant qu'acteur aux lots de travail WP4 et WP6.

L'objectif du lot de travail WP1 était de spécifier les principes de fonctionnement du module de conception système en adéquation avec le standard d'ingénierie système EIA-632 ainsi qu'en synergie avec les autres modules (WP2 chargé de la planification de projet et WP3 chargé du couplage entre les deux autres modules. J'ai rédigé deux livrables (L1 et L5) :

- L1 : *Premières descriptions des méthodes et principes de l'environnement de conception produit/système*- 65 pages ;
- L5 : *Spécifications détaillées de l'environnement de conception - Algorithmes de réutilisation des acquis* - 74 pages.

La thèse en contrat CIFRE de Joël ABEILLE, réalisée en co-encadrement avec le laboratoire CGI - Ecole des Mines d'Albi, a permis de proposer les modèles ainsi que les mécanismes de couplage entre les processus. Une ontologie de concepts utilisables en tant que base de connaissance a été formalisée ainsi que des mécanismes de réutilisation d'expériences de conception. Les Master Recherche de Céline BOITTE (2009) et de Juan ROMERO (2010), réalisés en support de la thèse de Joël ABEILLE, ont permis d'étudier certains algorithmes de réutilisation basés sur une ontologie. Les travaux réalisés et les résultats obtenus sont détaillés dans mon activité de recherche (voir Partie 2). Ce travail a donné lieu à la publication A3 ainsi qu'aux communications B.1, B.3, B.9, B.12, B.14, B.16 et C.7 (voir section 3.5, pages 26 et 27). Enfin, dans ce projet, j'ai participé de manière active aux réunions de travail pour les lots WP4 (chargé de l'intégration des différents modules) et WP6 (chargé de la définition des cas d'utilisation en relation avec les industriels).

Projet FUI Hélimaintenance (*Hybridation de techniques de propagation de contraintes (CSP) et de raisonnement à partir de cas (CBR) pour l'aide à la maintenance d'hélicoptères*)

Ce projet, labellisé par le pôle Aerospace Valley, s'est déroulé entre 2009 et 2012 en collaboration avec le laboratoire CGI - Ecole des Mines d'Albi. L'objectif était de développer un outil intégré d'aide à la décision permettant d'aider la définition d'activités de maintenance d'hélicoptères. Les modèles

proposés exploitent des connaissances formalisées par des *CSP* et des expériences de maintenance passées avec le contexte d'utilisation des hélicoptères. Les algorithmes développés permettent de fixer, par exploitation des expériences capitalisées, des contraintes dites *contextuelles*, c'est-à-dire qui dépendent du contexte dans lequel on les met en œuvre. Ce travail est décrit dans mon activité de recherche dans la partie 2 et a donné lieu à la publication A.2 ainsi qu'aux communications B.17, B.18, B.19 (voir section 3.5, pages 26 et 27).

Ma responsabilité scientifique dans ce projet a consisté à co-encadrer la thèse d'Aurélien CODET DE BOISSE avec Elise VAREILLES, Michel ALDANONDO et Laurent GENESTE.

Contrat CIFRE Juan ROMERO (*Résolution collaborative de problèmes en contexte distribué de chaînes logistiques*)

Durant la période 2010-2013, j'ai été amené à collaborer avec l'entreprise AXSENS-BTE basée à Toulouse, spécialisée dans le conseil dans le domaine des chaînes logistiques, dans le cadre de la thèse en contrat CIFRE de Juan ROMERO. J'ai co-dirigé cette thèse avec Laurent GENESTE. La problématique abordée concernait la définition d'un processus distribué de résolution de problèmes dans une chaîne logistique aéronautique. Les travaux ont mené à la définition d'un processus distribué générique basé sur trois modules coopérants : résolution de problèmes, retour d'expérience et chaînes logistiques. Dans ce travail, l'accent a été mis sur la formalisation/exploitation de connaissances au sein d'ontologies pour la résolution de problèmes dans ce contexte distribué ainsi que sur la formalisation d'outils permettant d'évaluer les capacités de coopération des partenaires impliqués dans la résolution de problèmes.

Ma responsabilité scientifique a consisté à co-encadrer cette thèse avec Laurent GENESTE (Directeur de thèse). Cette activité a donné lieu à la publication A.1 ainsi qu'aux communications B.4 et B.5 (voir section 3.5, pages 26 et 27)

Projet FUI 2PI-MCO : (*Amélioration de la Productivité des PME en Ingénierie Électrique pour une Maintenance et une Conception Optimisées*)

Depuis décembre 2013, le projet FUI 2PI-MCO (labellisé par le pôle Aerospace Valley) a débuté pour une durée de 30 mois. Mon activité de recherche, en partenariat avec Eric VILLENEUVE (Post-Doc.1), post-doctorant dont j'assure l'encadrement, consiste à formaliser/exploiter des connaissances en câblage électrique afin d'améliorer le processus de réponse à appel d'offre d'une entreprise spécialisée dans le levage industriel.

La figure 3 illustre l'aspect chronologique des projets croisés avec les travaux de recherche des étudiants que j'ai encadrés. Les activités en couleurs dégradées vert/bleu correspondent aux collaborations avec le laboratoire CGI - Ecole des Mines d'Albi. Les communications sont représentées dans les cercles et font référence à la section 3.5, page 26.

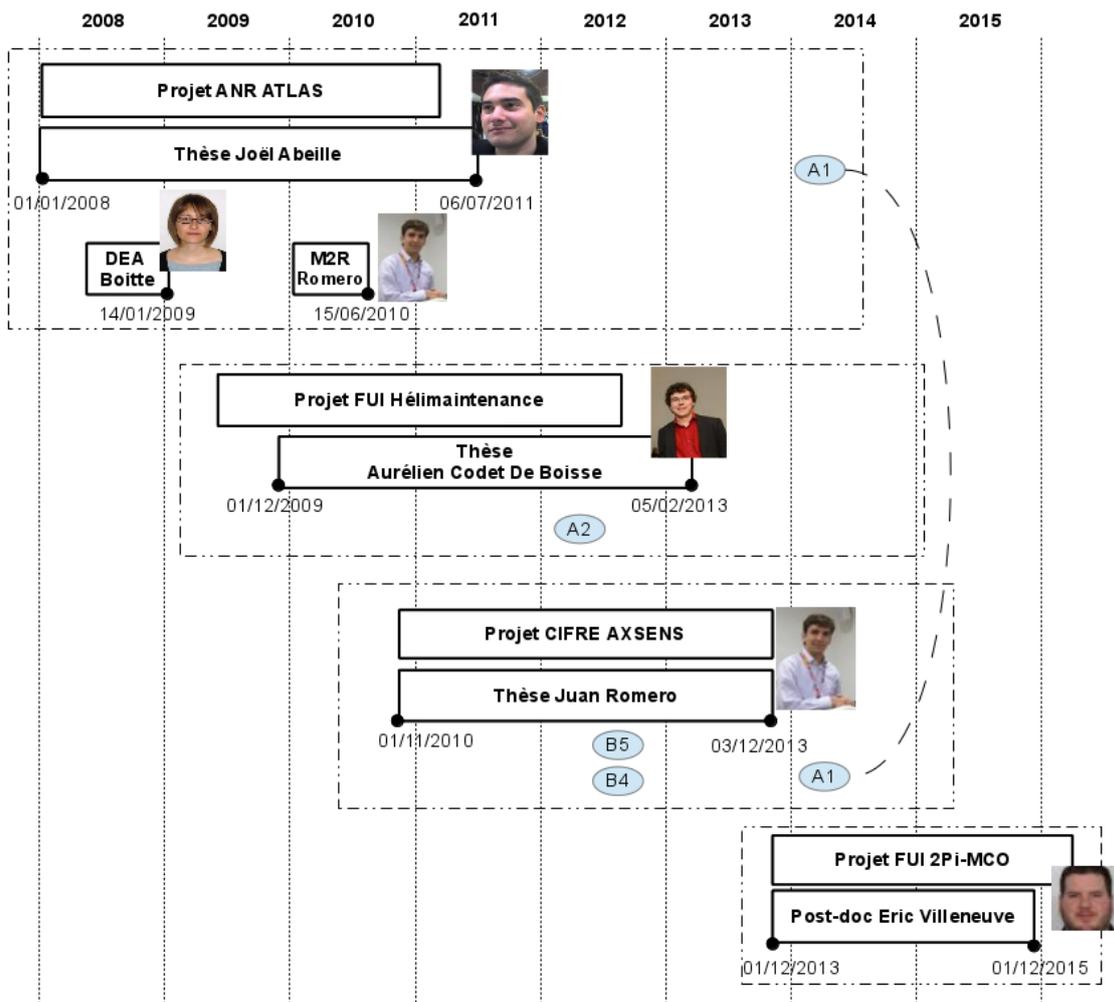


FIGURE 3 – Projets à responsabilités et encadrements de chercheurs

3.4 Activités d'animation de la recherche

Mon activité d'animation de la recherche, du point de vue national ou international, a consisté à participer à des jurys de thèse, des comités de sélection chargés du recrutement d'enseignant-chercheurs, à participer à des comités de congrès (organisation et/ou programme), à organiser des sessions spéciales, à répondre à des invitation de présidence de sessions et de rédaction d'un éditorial d'une revue scientifique et à contribuer au fonctionnement du GDR-MACS. Ces activités sont synthétisées ci-dessous.

Participation à des jurys de thèses extérieures : j'ai été invité à deux jurys de thèse en tant qu'examineur en 2007 et 2010 :

- Membre du jury de thèse (examineur) de Carmen LOPEZ-VARELLA soutenue le 17 décembre 2007 (LAAS-CNRS à Toulouse). Titre : « *Détection et diagnostic basés cohérence pour les systèmes à événements discrets : Vers la prise en compte des erreurs de modélisation* » ;
- Membre du jury de thèse (examineur) de Meriem DJEFEL soutenue le 17 novembre 2010 (Centre de Génie Industriel – Ecole des Mines d'Albi). Titre : « *Couplage de la configuration de produit et de projet de réalisation : exploitation des approches par contraintes et des algorithmes évolutionnaires* ».

Participation à des commissions de spécialistes / comités de sélection :

- Membre élu de la commission de spécialistes de l'Université de Bretagne Sud, – Suppléant (2002-2003) ;
- Membre nommé de la commission de spécialistes de l'Université Paul Sabatier – 61ème section (2004-2009) ;
- Membre du comité de sélection de l'ENSEEIH en juin 2010 (61ème section – poste numéro MC0312) ;
- Membre du comité de sélection de l'ENIT en juin 2010 (61ème section – poste numéro MC0053).

Support à l'organisation de congrès nationaux ou internationaux : depuis 2004, j'ai participé à plusieurs congrès nationaux ou internationaux de diverses manières :

- Membre du comité d'organisation du congrès EDSYS'06 de l'école doctorale systèmes. J'ai organisé et présidé la session "Systèmes d'information et ingénierie des systèmes" ;
- Membre du comité d'organisation des Journées Doctorales MACS 2007 et 2009 – Responsable du site de soumission des articles en ligne pour les journées doctorales MACS 2007 à Reims (JD-MACS 2007) et (JD-MACS 2009) à Angers. J'ai assuré le développement/paramétrage du site de soumission (Outil Openconf), la gestion des articles et des auteurs (téléchargement des articles), la gestion des rapporteurs (gestion des problèmes de connexions, mots de passe et saisie des rapports en ligne), la gestion des rapports et les mailings.

J'ai obtenu un **prix du GDR MACS** en 2007 pour le service rendu.

- Membre du comité d'organisation du Congrès International de Génie Industriel à Bagnères de Bigorre (CIGI'09) - 10, 11 et 12 juin 2009. Responsable du site de soumission des articles en ligne. Développement/paramétrage du site de soumission (Outil Openconf), Gestion des articles et des auteurs, gestion des rapporteurs, affectation des rapporteurs, gestion des rapports et des mailing.
- Membre du comité de programme des Journées Doctorales MACS JDMACS'09, JDMACS'11 et JDMACS'13.

- Membre du comité de programme du congrès CIGI'2011 (Congrès International de Génie Industriel) qui a eu lieu à Montréal (8 articles à évaluer).
- Membre du comité de programme du congrès IEEE IEEM'2013 (Industrial Engineering and Engineering Management) qui a eu lieu à Bangkok (15 articles à évaluer).
- Invitation à co-présider la session spéciale nommée « EXPAND » dans le congrès CIGI'2009 (Congrès International de Génie Industriel) à Bagnères de Bigorre.
- Invitation à co-présider une session intitulée « Information processing and engineering » (8 articles) dans le congrès IEEE IEEM'2012 (Industrial Engineering and Engineering Management) à Hong Kong.

Durant la période 2010-2012, j'ai proposé, organisé et présidé trois sessions spéciales dans des congrès nationaux ou internationaux. L'objectif était de fédérer des travaux sur les processus de conception de systèmes étendus tout au long du cycle de vie du produit en permettant à des chercheurs de présenter leurs travaux sur les outils, mécanismes, méthodes ou approches de couplage entre les différents processus qui interviennent dans le cycle de vie.

Les sessions sont les suivantes :

- Organisation d'un « track » (2 sessions) dans le congrès international MOSIM'10 (10-12 mai 2010) intitulé « Conception étendue » – 8 articles présentés. Mon travail a consisté à affecter des rapporteurs aux articles et de gérer les retours. J'ai organisé le track en deux sessions de quatre présentations chacune que j'ai ensuite coprésidé.
- Organisation d'une session spéciale dans le congrès international de génie industriel à Montréal en 2011 (CIGI'11) intitulée « Conception étendue » dans le but de poursuivre la dynamique engagée en 2010. J'ai ensuite co-présidé cette session (4 présentations).
- Organisation d'une session spéciale dans le congrès international IFAC INCOM'12 en 2012 à Bucharest intitulée « Extended Product Design and Product Lifecycle Management » dans le but de poursuivre la dynamique engagée en 2010 à un niveau international. J'ai ensuite co-présidé cette session (quatre présentations) avec Amira Sharon (Israel Institute of Technology).

Invitation à l'écriture d'un éditorial de section spéciale dans une revue scientifique : J'ai coécrit un éditorial dans la revue INTERNATIONAL JOURNAL OF PRODUCTION ECONOMICS (IJPE) pour une section spéciale intitulée « *Anticipation of risks impacts and industrial performance evaluation in distributed organizations life cycles* ». Des articles sélectionnés lors du congrès CIGI'09 ont été publiés dans cette section spéciale. L'éditorial, coécrit avec Raymond Houé N'Gouna (LGP-ENIT), permet de décrire le contexte de cette section et d'introduire le contenu des articles.

Activités réalisées en support à l'animation du GDR-MACS : Entre 2004 et 2007, j'ai été responsable de la conception et de la diffusion de « La lettre du GDR MACS STP », une lettre d'information électronique bi-annuelle envoyée à l'ensemble de la communauté du GDR MACS STP. Des informations générales en rapport avec la communauté, des appels à congrès, des soutenances de thèses et d'HDR y étaient diffusées, une fois collectées.

Invitations à relire des articles de revues scientifiques internationales : je suis relecteur pour des revues scientifiques depuis 2001. En moyenne, je suis chargé de relire cinq articles chaque années pour les revues suivantes : Journal Européen des Systèmes Automatisés (JESA), International Journal

of Production Research (IJPR), Engineering Applications of Artificial Intelligence (EAAI), Artificial Intelligence in Engineering, Design, Analysis and Management (AI-EDAM), Concurrent Engineering Research and Applications (CERA).

Mon activité d'animation interne de la recherche au Laboratoire Génie de Production s'est concrétisée par :

- ma **participation au Conseil de Laboratoire** (en tant que membre élu par le corps des maîtres de conférence) entre 2004 et 2012,
- ma **participation à la commission chargée du recrutement annuel des ATER** à l'ENIT en section 61 (depuis 2005).

L'ensemble des activités décrites dans les sections précédentes ont mené à la rédaction de publications et de communications dont la liste est donnée dans la section 3.5. Ces articles sont classés en sept catégories : les publications dans des revues à comité de lecture (référencées A.i)¹, les communications internationales avec actes édités (référencées B.i), les communications nationales avec actes édités (référencées C.i), les communications nationales sans actes édités (référencées D.i), des articles dans une revue scientifique nationale électronique (référencées E.i), un éditorial dans une revue internationale (référencée F.1), les rapports de projet (référencés G.i) et mes propres mémoires de DEA et de thèse (référencées H.i).

1. i est le numéro des publications ou communications dans la catégorie.

3.5 Liste des publications et communications

A) Articles dans des revues scientifiques à comité de lecture

- A.1. ROMERO BEJARANO J.C., **COUDERT T.**, VAREILLES E., ALDANONDO M., ABELILLE J., Case-Based reasoning and system design : An integrated approach based on ontology and preference modeling, *ARTIFICIAL INTELLIGENCE FOR ENGINEERING, DESIGN, ANALYSIS AND MANUFACTURING, AI-EDAM*, Vol. 28(1), pp.49-69, 2014. [**SCOPUS & ISI-WOS**]
- A.2. VAREILLES E., ALDANONDO M., CODET DE BOISSE A., **COUDERT T.**, GABORIT P., GENESTE L., How to take into account general and contextual knowledge for interactive aiding design : towards the coupling of CSP and CBR approaches, *ENGINEERING APPLICATIONS OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE, EAAI*, Vol. 25(1), pp.31-47, 2012. [**SCOPUS & ISI-WOS**]
- A.3. PITIOT P., **COUDERT T.**, GENESTE L., BARON C., Hybridation of Bayesian networks and Evolutionary Algorithms for multi-objective optimization in an integrated product design and project management context, *ENGINEERING APPLICATIONS OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE, EAAI*, Vol. 23 (5), pp.830-843, 2010. [**SCOPUS & ISI-WOS**]
- A.4. KAMSU-FOGUEM B., **COUDERT T.**, BELER C., GENESTE L., Knowledge Formalization in Experience Feedback Processes : An Ontology-Based Approach, *COMPUTERS IN INDUSTRY*, No 7, Vol. 59, pp. 694-710, September 2008. [**SCOPUS & ISI-WOS**]
- A.5. VIEL S., **COUDERT T.**, GENESTE L., Proposition d'une architecture composée de multiples processus de retour d'expérience coopérants, *REVUE FRANÇAISE DE GESTION INDUSTRIELLE, RFGI*, Vol.25 (4), pp.57-75, 2006.
- A.6. KINDLER E., **COUDERT T.**, BERRUET P., Component-Based Simulation for a Reconfiguration Study of Transitive Systems, *SIMULATION-TRANSACTIONS OF THE SOCIETY FOR MODELING AND SIMULATION INTERNATIONAL*, Vol. 80 (3), pp.153-163, 2004. [**SCOPUS & ISI-WOS**]
- A.7. **COUDERT T.**, GRABOT B., ARCHIMEDE B., Systèmes multi-agents et logique floue pour un ordonnancement coopératif Production/Maintenance, *JOURNAL OF DECISION SYSTEMS, JDS*, Editor : Taylor & Francis, Vol. 13 (1), pp. 27-62, 2004.
- A.8. **COUDERT T.**, GRABOT B., ARCHIMEDE B., Production/Maintenance Co-operative Scheduling Using Multi-Agents and Fuzzy Logic, *INTERNATIONAL JOURNAL OF PRODUCTION RESEARCH, IJPR*, Vol. 40(18), pp.4611-4632, 2002. [**SCOPUS & ISI-WOS**]
- A.9. ARCHIMEDE B., **COUDERT T.**, Reactive scheduling using a multi-agent system : the SCEP framework, *ENGINEERING APPLICATIONS OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE, EAAI*, Vol. 14(5), pp. 667-683, October 2001. [**SCOPUS & ISI-WOS**]
- A.10. ARCHIMEDE B., **COUDERT T.**, Ordonnancement des systèmes flexibles de production. Une approche coopérative basée sur le modèle d'agents SCEP, *JOURNAL EUROPEEN DES SYSTEMES AUTOMATISÉS, APII-JESA*, Vol. 35 (9), pp.1029-1054, 2001. [**SCOPUS**]
- A.11. ARCHIMEDE B., PRIEM L., **COUDERT T.**, Ordonnancement multi-sites de systèmes flexibles de production via Corba, *APII-JESA, JOURNAL EUROPEEN DES SYSTEMES AUTOMATISÉS*, Edition Hermès Science, volume 34 (2-3), pp.317-330, 2000. [**SCOPUS**]

B) Communications internationales avec actes édités :

- B.1. PITIOT P., ALDANONDO M., VAREILLES E., ZHANG L., **COUDERT T.**, Optimizing Concurrent Configuration and Planning : A Proposition to Reduce Computation Time, Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, IEEM2013, 10-13 december 2013, Bangkok. (**Outstanding Paper Award**)
- B.2. **COUDERT T.**, VAREILLES E., GENESTE L., ALDANONDO M., Improvement of Retrieval in Case-based Reasoning for System Design, Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, IEEM2012, 13 December 2012, Hong Kong.
- B.3. PITIOT P., ALDANONDO M., VAREILLES E., ZHANG L., **COUDERT T.**, Some Experimental Results Relevant to the Optimization of Configuration and Planning Problems – Proceedings of ISMIS, Lecture Notes in Artificial Intelligence, vol. 7661, pp 301-310 – 2012.
- B.4. ROMERO BEJARANO J.C., **COUDERT T.**, GENESTE L., DE VALROGER A., Collaborative Methodology for Supply Chain Quality Management : Framework and Integration With Strategic Decision Processes in Product Development, Proceedings of the 6th European Conference on Information Management and Evaluation – ECIME 2012, Academic Publishing International Limited, pp.418-428, 13-14 September 2012, Cork, Ireland (**Best Paper Award**).
- B.5. ROMERO BEJARANO J.C., **COUDERT T.**, GENESTE L., DE VALROGER A., Technical and Collaboration Breakdown Structures : Drivers of Collaborative Problem Solving Approaches in a Supply Chain Context , ELSEVIER, Proceedings of the 14th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing, Vol. 14, Part 1, pp. 1184-1189, Eds. T. Borangiu, A. Dolgui, I. Dumitrache, F. Filip, Bucharest, ROMANIA , 23-25 May 2012. **Best Paper Award**)
- B.6. VAREILLES E., **COUDERT T.**, ALDANONDO M., GENESTE L., ABEILLE J., Coupling system design and project planning : discussion on a bijective link between system and project structures, ELSEVIER, Proceedings of the 14th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing, Vol. 14, Part 1, pp. 1089-1094, Eds. T. Borangiu, A. Dolgui, I. Dumitrache, F. Filip, Bucharest, ROMANIA , 23-25 May 2012.
- B.7. **COUDERT T.**, VAREILLES E., GENESTE L., ALDANONDO M., ABEILLE J., Proposal for an integrated Case Based Project Planning and system design process, Proceedings of the 2nd International Conference en Complex Systems Design & Management, CSDM'2011, Eds. O. Hammami, D. Krob, J.L. Voirin, Springer Verlag, 7-9 septembre 2011, Paris (France).
- B.8. **COUDERT T.**, VAREILLES E., ALDANONDO M., GENESTE L., ABEILLE J., Synchronization of System Design and Project Planning : Integrated Model and Rules, 5th IEEE International Conference on Software, Knowledge, Information, Industrial Management and Applications (SKIMA' 2011), pp. 1-6, September 8-11, Benevento (Italy), 2011.
- B.9. PITIOT P., ALDANONDO M., DJEFEL M., VAREILLES E., GABORIT P., **COUDERT T.**, Using constraints filtering and evolutionary algorithms for interactive configuration and planning, Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM), - IEEE press, p.1921-1925, 2010, Macao China, December 7-10, 2010 (**Best Paper Award**).
- B.10. ABEILLE J., **COUDERT T.**, VAREILLES E., ALDANONDO M., GENESTE L., ROUX T., Formalization of an Integrated System / Project Design Framework : First Models and Processes,

Proceedings of the first international conference on Complex Systems Design & Management, CSDM'2010, Aiguier M., Bretaudeau F., Krob D. (Eds.), Springer, pp. 207-217, October 27-29, 2010, Paris, France.

- B.11. ALDANONDO M., ABEILLE J., VAREILLES E., **COUDERT T.**, GENESTE L., BELER C., System design and design planning : an interaction identification, 8th International Conference of Modeling and Simulation - MOSIM'10 - May 10-12, 2010 - Hammamet – Tunisia.
- B.12. PITIOT P., **COUDERT T.**, GENESTE L., BARON C., A priori knowledge integration in intelligent optimization, 9th International Conference on Artificial Evolution, EA'09, Springer's Lectures Notes in Computers Science, Vol. 5975/2010, pp. 98-109, Strasbourg, 26-28 october 2009.
- B.13. PITIOT P., **COUDERT T.**, GENESTE L., BARON C., An expert knowledge reuse to guide evolutionary computation, International Conference on Metaheuristics and Nature Inspired Computing, META'08, October, 29-30, Hammamet, Tunisia, 2008.
- B.14. PITIOT P., **COUDERT T.**, GENESTE L., BARON C., Improvement of intelligent optimisation by an experience feedback approach, 8th International Conference on Artificial Evolution (EA'07), pp.316-327, Springer's Lectures Notes in Computers Science, Vol. 4926/2008, October 29-31 2007, Tours.
- B.15. VIEL S., **COUDERT T.**, GENESTE L., CHERENCQ F. Proposition of a multi co-operating experience feedback processes architecture, IFAC MCPL'07, 27-30 September 2007, vol. I, pp. 79-84, Sibiu, Romania.
- B.16. PITIOT P., **COUDERT T.**, GENESTE L., BARON C., A framework for the improvement of combinatorial optimisation : an experience feedback approach, IFAC MCPL'07, 27-30 septembre 2007, vol. III, pp.565-570, Sibiu, Romania.
- B.17. BERRUET P., **COUDERT T.**, KINDLER E., Component-Based simulation – A view from transitic system models, ASIS 2004, Hostyn (Czech Republic), September 22-24, 2004, pp.259-264.
- B.18. **COUDERT T.**, BERRUET P., KINDLER E., Application of Reflective Models of a Transitic System, Proceedings of the Industrial Simulation Conference 2004, ISC-2004, June 7-9, Malaga, Spain, 2004, pp. 289-293.
- B.19. BERRUET P., **COUDERT T.**, KINDLER E., Conveyors With Rollers And Their Reflective Simulation, The International Workshop on Modeling & Applied Simulation, MAS'2003, Bergeggi, Italy, October 2 - 4, 2003.
- B.20. BERRUET P., **COUDERT T.**, KINDLER E., Object-Oriented Reflective Simulation of Transitic Systems, In Y. Merkurjev, A. G. Bruzzone, G. Merkurjeva, L. Novitsky, E. Williams (editors), The International Workshop on Harbour, Maritime and Multimodal Logistics Modelling & Simulation HMS 2003. Riga Technical University, Riga, pp. 202-205, September 18-20, 2003.
- B.21. **COUDERT T.**, BERRUET P., PHILIPPE J.L., "Integration of reconfiguration in transitic systems : an agent-based approach, Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Systems, Man & Cybernetics, SMC'03, pp. 4008-4014, vol.4, October 5–8, 2003, Washington, D.C., USA.
- B.22. BERRUET P., **COUDERT T.**, KINDLER E., "Reflective simulation of conveyors with Simula", ASU 2003, Hostyn (Rep. Tchèque), September 10-12, 2003, pp.7-18.

- B.23. BERRUET P., COUDERT T., KINDLER E., "Nested Simulation of Transitive Systems : An Application to Conveyors With Rollers", ASIS 2003, Hostyn (Rep. Tchèque), September 8-10, 2003, pp.47-53.
- B.24. BERRUET P., **COUDERT T.**, KINDLER E., "Conveyors With Rollers as Anticipatory Systems : Their Simulation Models", in AIP Conference Proceedings Vol 718(1) pp. 582-592., COMPUTING ANTICIPATORY SYSTEMS : CASYS'03 - Sixth International Conference, Liege (Belgium), 11-16 August 2003.
- B.25. BERRUET P., **COUDERT T.**, PHILIPPE J.L., "Integration of dependability aspects in transitive systems", Proceedings of the IEEE multiconference IEEE-IMACS CESA 2003, Lille, July 9-11, 2003.
- B.26. **COUDERT T.**, BERRUET P., PHILIPPE J.L., "From Design to Integration of Transitive Systems : A Component-Based Approach", Proceedings of the 28th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, IECON'02, Vol. 1, pp. 2487-2502, November 4-8, 2002, Sevilla, Spain.
- B.27. VIDAL T., ARCHIMEDE B., **COUDERT T.**, "Distributed forward checking for scheduling in flexible manufacturing cells ", 8th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation ETFA'2001, 15-18 Octobre 2001, Antibes, France.
- B.28. **COUDERT T.**, GRABOT B., ARCHIMEDE B., Integration of maintenance constraints in scheduling : fuzzy modelling and multi-agent approach, Actes de la 4ème conférence IEEE/IFIP Balanced Automation SYSTEMS (BASYS'2000), Publié dans Advances in Networked Enterprises : Virtual Organisations, Balanced Automation and Systems Integration, Editeurs : Camarinha-Matos L.M., Afsarmanesh H., Erbe H.H, Kluwer Academic Publishers, pp. 297-304, Berlin, Allemagne, 27-29 septembre 2000.
- B.29. ARCHIMEDE B., **COUDERT T.**, PRIEM L., "Un modèle d'agent générique pour l'ordonnement des systèmes flexibles de production", Workshop on European Scientific and Industrial Collaboration on promoting Advanced Technologies in Manufacturing : WESIC'98, pp15-18. Girona, Espagne, 10-12 juin 1998.
- B.30. ARCHIMEDE A., **COUDERT T.**, "A multi-agent scheduling approach for the flexible manufacturing systems", IFAC Workshop on Distributed Computer Control Systems : DCCS'98. Come, Italie, 9-11 Septembre 1998.

C) Communications nationales avec actes édités :

- C.1. CODET DE BOISSE A., VAREILLES E., **COUDERT T.**, GABORIT P., ALDANONDO M., GENESTE L., Couplage des approches par contraintes et par analogie : application à la maintenance d'hélicoptères, 7èmes Journées Francophones de Programmation par Contraintes, JF-PC'2011, 8-10 juin 2011, Lyon.
- C.2. CODET DE BOISSE A., VAREILLES E., **COUDERT T.**, GABORIT P., ALDANONDO M., GENESTE L., Couplage des approches par analogie et par contraintes : spécifications d'un outil d'aide à la décision en maintenance d'hélicoptères, 19ème atelier Français de Raisonnement à Partir de Cas, 16 mai 2011, Chambéry.
- C.3. CODET DE BOISSE A., VAREILLES E., GABORIT P., ALDANONDO M., **COUDERT T.**, GENESTE L., Couplage CSP et CBR : premières identifications des modes de couplage, 8th

International Conference of Modeling and Simulation - MOSIM'10 - May 10-12, 2010 - Hammamet – Tunisia.

- C.4. ALDANONDO M., ABEILLE J., VAREILLES E., **COUDERT T.**, GENESTE L., Vers une identification des interactions conception de système et gestion de conception, Congrès Conception Production Intégrée, Fez, Maroc, CPI'09, 19-21 octobre, 2009.
- C.5. ABEILLE J., GORIS G., VAREILLES E., ROUX T., ALDANONDO M., **COUDERT T.**, Couplage de la Conception de Produit et de la Planification de Projet : Première Analyse des Pratiques Industrielles, CIGI'09, Congrès International de Génie Industriel, 10-12 juin, Bagnères de Bigorre, 2009.
- C.6. BOITTE C., **COUDERT T.**, GENESTE L., Formalisation d'un processus de réutilisation des acquis de conception – Projet ATLAS, CIGI'09, Congrès International de Génie Industriel, Bagnères de Bigorre, 10-12 juin 2009.
- C.7. **COUDERT T.**, KAMSU-FOGUEM B., Amélioration continue : outillage d'un processus de retour d'expérience par une ontologie et des graphes conceptuels, Actes du congrès MOSIM'08, pp. 1299-1308, 2 avril 2008, Paris.
- C.8. PITIOT P., **COUDERT T.**, GENESTE L., BARON C., Proposition d'un cadre pour l'intégration d'un mécanisme de Retour d'Expérience en optimisation combinatoire, Actes de la conférence JD-MACS 2007, Journées doctorales MACS 2007, 9-10 juillet 2007, Reims.
- C.9. PITIOT P., **COUDERT T.**, GENESTE L., Spécification d'une architecture d'ordonnancement distribuée hiérarchisée basée sur le logiciel CADPLAN, Actes de la sixième conférence Francophone de Modélisation et SIMulation (MOSIM'06), Eds. M. Gourgand et F. Riane, Tech&Doc, pp. 146-155, 3-5 avril 2006, Rabat, Maroc.
- C.10. BERRUET P., **COUDERT T.**, KINDLER E., Vers une simulation réflexive en ingénierie des systèmes transitoires, Actes de la cinquième conférence francophone de Modélisation et SIMulation (MOSIM'04), Nantes, France, 1-3 septembre 2004.
- C.11. **COUDERT T.**, ARCHIMEDE B., « Ordonnancement avec temps de préparation dépendant de la séquence : Une approche par système multi-agents », CPI'01 ; 24-25-26 octobre 2001, Fès, Maroc.
- C.12. **COUDERT T.**, GRABOT B., ARCHIMEDE B., « Logique floue et systèmes multi-agents pour un ordonnancement coopératif Production/Maintenance », Troisième conférence Francophone de MODélisation et SIMulation (MOSIM'01), Eds. A. Dolgui et F. Vernadat, Publications de SCS International, 25-27 Avril 2001, Troyes, France.
- C.13. **COUDERT T.**, ARCHIMEDE B., GRABOT B., Un système multi-agents pour la coopération Production/Maintenance, Actes de la deuxième conférence francophone de Modélisation et SIMulation (MOSIM'99), Editeurs : Geoges Habchi et Alain Haurat, Publications de SCS International, Annecy, France, 6-8 Octobre 1999.
- C.14. ARCHIMEDE B., **COUDERT T.**, « Ordonnancement dynamique dans les ateliers de fabrication. Une solution à base d'agents », 3ème Congrès International de Génie industriel, CIGI'99, Montréal, 26-28 Mai 1999.

D) Communications nationales sans actes édités :

- D.1. VIEL S., COUDERT T., GENESTE L., Proposition d'une architecture composée de multiples processus de retour d'expérience coopérants, Semaine de la connaissance, C2EI'06, Nantes, juin 2006.
- D.2. COUDERT T., ARCHIMEDE B., A distributed approach for the dynamic scheduling of maintenance activities, Proceedings of the conference CPI'05, Integrated Design and Production, November, 9-11, 2005, Casablanca, Morocco.
- D.3. COUDERT T., ARCHIMEDE B., PRIEM L., Un système multi-agents pour l'ordonnement des systèmes flexibles de production, Deuxième journée, Acteurs, Agents & Apprentissage, Centre interdisciplinaire de recherche de l'IUT de Bayonne-UPPA, 4 septembre 1998.

E) Article dans une revue scientifique nationale électronique :

- E.1. ALDANONDO M., ABEILLE J., COUDERT T., VAREILLES E., GENESTE L., Vers une identification des interactions conception de système et gestion de conception, Revue d'Ingénierie Numérique Collaborative, CPI'09-03, 2011.

F) Éditorial de revue scientifique internationale à comité de lecture :

- F.1. COUDERT T., HOUE-NGOUNA R., Special Section : Anticipation of risks impacts and industrial performance evaluation in distributed organizations life cycles, Editorial, INTERNATIONAL JOURNAL OF PRODUCTION ECONOMICS, IJPE, 142(2), pp. 213-213, 2013. [SCOPUS & ISI-WOS]

G) Rapports de projet :

- G.1. COUDERT T., GENESTE L., ROBERT A., ESTEBAN P., ESTEVE D., PASCAL J.C., Livrable L1, Premières descriptions des méthodes et principes de l'environnement de conception Produit/Système (concepts de base, principes envisageables, entités manipulées, scénarios d'utilisation, types de connaissances nécessaires, éléments d'ergonomie succincts de l'environnement de conception, retour d'expérience) - 65 pages, mai 2008.
- G.2. COUDERT T., GENESTE L., ROBERT A., ESTEBAN P., ESTEVE D., PASCAL J.C., Livrable L5, Spécifications détaillées de l'environnement de conception - Algorithmes de réutilisation des acquis - Modèles UML - 74 pages, mai 2009.

H) Mémoire de DEA et thèse de doctorat :

- H.1. COUDERT T., Apport des systèmes multi-agents pour la négociation en ordonnancement : application aux fonctions production et maintenance, Institut National Polytechnique de Toulouse, Ecole doctorale Systèmes, Directeur de thèse : B. GRABOT, soutenue le 15 décembre 2000.
- H.2. COUDERT T., Conduite multi-niveaux des systèmes de production : généralisation des notions de capacité et de charge, Rapport de DEA Automatique et Productique, Laboratoire LAPS GRAI, Université de Bordeaux I, 1997.

4 Conclusion

Cette première partie a permis de synthétiser mes activités d'enseignement et de recherche réalisées depuis 2001. Après ma thèse réalisée au laboratoire LGP sous la direction de Bernard Grabot, j'ai passé trois années à l'Université de Bretagne Sud à Lorient dès l'obtention de mon premier poste de maître de conférences. Ensuite, j'ai réintégré l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tarbes où j'avais réalisé ma thèse. Cette parenthèse à Lorient a été très enrichissante car elle m'a permis de voir d'autres modes de fonctionnement, tant au niveau des activités pédagogiques que des activités de recherche. Elle a constitué pour moi une marche essentielle permettant de me lancer dans des activités de recherche différentes de celles développées dans ma thèse. Depuis 2004, mes activités d'enseignement se partagent entre l'informatique (bases de données, programmation, algorithmique, systèmes multiagents) et le génie industriel (outils du génie industriel, gestion de production, modélisation de systèmes décisionnels). Certaines années universitaires se sont vues plutôt chargées en enseignements en raison de changements dans les cursus qui ont entraîné la duplication de certains enseignements sur plusieurs semestres. Depuis 2010, le niveau horaire est revenu à une valeur nominale d'environ 200 heures annuelles en équivalent TD. Mes activités de recherche se sont partagées entre l'encadrement de chercheurs en master et en thèse, la prise de responsabilités dans des projets institutionnels (ANR ATLAS, FUI Hélimaintenance et FUI 2PI-MCO) et la participation à l'organisation ou au programme de congrès nationaux ou internationaux. Les activités que j'ai menées en recherche sont orientées vers l'aide à la décision en ingénierie système exploitant des expériences et des connaissances. La partie suivante permet d'exposer ces travaux de manière détaillée.

Deuxième partie
Activités de recherche

Chapitre 1

Introduction, Contexte de recherche et Problématique

1.1 Introduction

Cette seconde partie permet de décrire mes activités de recherche. Celles-ci ont débuté en 1997 par ma thèse dont le sujet concernait l'ordonnancement production / maintenance avec une approche par systèmes multiagents. Puis, à partir de 2001 et l'obtention de mon poste de maître de conférences à l'université de Bretagne Sud à Lorient, j'ai pu aborder la problématique de l'ingénierie système par une activité concernant la conception de systèmes *transitiques*. Enfin, à partir de 2004, j'ai pu développer mon activité actuelle concernant l'aide à la décision dans les processus d'ingénierie système par l'exploitation d'expériences et de connaissances.

Le contexte général de mes contributions se situe autour du processus d'ingénierie système. Pour les entreprises, dans un contexte où la concurrence sévère nécessite d'être systématiquement au meilleur niveau de performance, il est absolument nécessaire de maîtriser ses processus, notamment le processus d'ingénierie système et les processus aidant l'ingénierie système. Nos contributions sont axées sur quatre points principaux :

- aider à la reconfiguration de systèmes automatisés de transport (systèmes transitiques),
- aider la planification de projets d'ingénierie système,
- aider la résolution de problèmes,
- capitaliser et exploiter des expériences et des connaissances.

Cette partie du document est composée de six chapitres. Dans ce premier chapitre, le contexte ainsi que la problématique globale liée à mes activités de recherche sont décrits. Cette problématique globale est basée sur un modèle à trois niveaux : *Processus, Outils, Expériences / Connaissances* qui permet de fédérer l'ensemble de mes activités de recherche, des encadrements de chercheurs et des projets liés. La problématique globale définie autour de ce modèle permet ensuite de caractériser un ensemble de besoins et de propositions qui sont décrits tout au long du document. Ce modèle sert de vecteur pour guider la description des différentes problématiques, propositions et des résultats obtenus tout au long de la réalisation des thèses, masters recherche et projets institutionnels (ANR et FUI). Ce premier chapitre a été conçu de manière à définir les contextes et les problématiques à un niveau global. Des définitions sont données sur les concepts et approches utilisés. Afin de conforter ces problématiques, un premier niveau d'étude bibliographique permet de positionner les contributions au regard de la littérature. Les orientations choisies et les propositions faites pour répondre aux problématiques exprimées sont ainsi décrites et discutées globalement. Afin de fournir des explications plus détaillées, les chapitres 2 à 5 permettent ensuite de développer les problématiques (avec un second niveau plus détaillé d'étude bibliographique), les propositions et les résultats obtenus. Le but est de permettre une compréhension détaillée des mécanismes, des outils, des modèles et des approches développés.

Le document est donc organisé de la manière suivante. Le premier chapitre permet, après avoir exposé rapidement mes travaux de thèse ainsi que mon insertion dans les activités des laboratoires LESTER et LGP, d'exposer la problématique globale autour du modèle *Processus, Outils, Expériences / Connaissances*. Ensuite, les travaux réalisés au laboratoire LESTER de Lorient sur la reconfiguration des systèmes transitiques sont exposés dans le second chapitre. Le chapitre 3 aborde la planification de projets d'ingénierie système. Le chapitre 4 traite de la réutilisation d'acquis à des fins d'aide à l'ingénierie système. Le chapitre 5 permet d'exposer nos travaux sur la résolution distribuée de problèmes. Enfin, le chapitre 6 permet de conclure et de définir mon projet de recherche.

Note : Les communications pour lesquelles je suis coauteur sont référencées en bleu et suivies du numéro de l'article tel que représenté dans la liste de mes publications (partie I, section 3.5, pages 24 à 29). Par exemple, [Coudert et al., 2011a] (B.8) fait référence au 8^{ème} article de congrès international avec comité de lecture et actes édités.

1.2 En amont de mon projet : la thèse

Cette section est un préambule à la description de mon activité de recherche. Mes activités scientifiques ont débuté en 1997 par ma thèse réalisée au Laboratoire Génie de Production sous la direction de Bernard GRABOT. Le travail développé est synthétisé ci-dessous afin de montrer les apports pour la construction ultérieure de mon activité scientifique.

Le contexte global de ce travail était le pilotage d'atelier de production à l'aide d'une approche par agents. Nous avons proposé un système de pilotage modulaire, flexible et réactif. Les prises de décision successives impliquant des centres de décision appartenant à divers services ou fonctions de l'entreprise peuvent recevoir des objectifs différents des niveaux décisionnels supérieurs. A court terme, les centres de décision impliqués pouvant agir sur les mêmes ressources, les objectifs peuvent se retrouver, au moins partiellement, en conflit. Afin de résoudre ces conflits, des échanges entre centres de décision d'un même niveau hiérarchique permettent de négocier des compromis. Le compromis obtenu correspond alors à un équilibre quant à la satisfaction des objectifs confiés aux différents centres de décision.

Nous avons donc proposé un modèle de pilotage appliqué à l'ordonnancement de production et de maintenance où la coordination des décisions est requise. Un cadre favorable à la coopération et la négociation pour traiter les problèmes d'ordonnancement de manière décentralisée a été proposé. Un modèle à base d'agents et des mécanismes de négociation ont été formalisés. Une plate-forme multi-agent a été développée afin de valider notre approche sur des scénarios où des conflits apparaissaient, en résolvant ces conflits par des processus de coopération, équilibrant ainsi la satisfaction des différents objectifs à atteindre.

Ce travail, de par son aspect *formation par la recherche*, m'a permis de fonder les piliers supportant le reste de mon activité. Ces piliers sont les suivants :

- une vision clarifiée de la problématique de l'ordonnancement et, plus globalement, de celles de la planification et du pilotage d'atelier,
- l'identification du besoin de formalisation de points de couplages entre différents processus aux objectifs quelquefois conflictuels afin de proposer une aide à la décision,
- la mise en évidence du besoin d'outils d'aide à la décision permettant de comprendre et résoudre les conflits.

Basée sur ces piliers, mon activité de recherche s'est ensuite poursuivie au laboratoire LESTER (devenu LAB-STICC depuis) puis, suite à ma mutation, de nouveau au laboratoire LGP. Mes activités dans ces équipes sont décrites dans la section suivante.

1.3 Insertion dans les activités des laboratoires

En septembre 2001, dans le cadre de mon premier poste de Maître de Conférences au laboratoire **LESTER** de l'**Université de Bretagne Sud**, j'ai été intégré dans l'équipe **Systèmes Reconfigurables**. En 2001, la thématique générale abordée par l'équipe concernait la co-conception (ou *codesign*) d'architectures électroniques avec les logiciels devant s'exécuter sur ces architectures. Notre équipe étudiait plus particulièrement la co-conception des systèmes automatisés de production et, notamment, des systèmes transistiques, avec leur commande discrète. Les systèmes transistiques sont des systèmes de transports automatisés à base de convoyeurs, vérins, systèmes de blocage, d'éjection, etc. Le principe consiste à concevoir conjointement en les intégrant la partie physique et la partie commande, en util-

isant une approche par composants réutilisables et archivés. La commande est mise en œuvre par des Automates Programmable Industriels (API). De tels systèmes sont considérés comme *reconfigurables* dans la mesure où ils sont capables de s'adapter aux variations de l'environnement ou du système lui-même lors de dysfonctionnements. C'est donc dans ce contexte de recherche que mon activité s'est déroulée entre 2001 et 2004.

Suite à ma mutation en septembre 2004, j'ai intégré l'**équipe Systèmes Décisionnels et Cognitifs (SDC) du laboratoire LGP à l'ENIT**. L'activité de cette équipe vise à la définition et l'évaluation de modèles, d'outils et de méthodologies destinés à l'amélioration du fonctionnement et du pilotage des systèmes socio-techniques (systèmes faisant intervenir simultanément acteurs humains et ressources technologiques). Deux axes sont explorés par l'équipe : i) la formalisation et l'exploitation de modèles de connaissances, d'expériences et de compétences ; ii) l'évaluation des risques pour la décision. Mes activités se sont principalement orientées vers le premier axe en se concentrant sur les aspects expériences et connaissances utilisées conjointement pour alimenter des outils basés sur des techniques d'intelligence artificielle. Ces outils permettent notamment d'améliorer le fonctionnement et le pilotage des processus d'ingénierie système et de résolution de problèmes.

1.4 Problématique générale de mon activité de recherche

Mon activité scientifique s'est progressivement construite durant la période 2001-2014. La problématique générale abordée tout au long de ces années concerne l'aide à la décision, basée sur des connaissances et des expériences, autour de certaines activités d'un processus d'ingénierie système. En effet, lors de la réalisation des activités d'ingénierie, de très nombreuses décisions sont à prendre. Dans les travaux développés, nous considérons qu'une aide à la décision peut être apportée par des outils basés sur l'exploitation d'expériences et de connaissances. A des requêtes exprimées par les décideurs, les outils que nous développons sont en mesure d'apporter des solutions construites à l'aide des acquis de l'entreprise. Le corollaire est qu'un processus de retour d'expérience doit être mis en œuvre afin de capitaliser ces acquis et de les exploiter quand cela est nécessaire. Ainsi, chaque acteur du processus d'ingénierie doit être en mesure de consulter des expériences passées afin de les réutiliser, de s'en inspirer ou, au contraire, de ne pas réitérer les erreurs précédemment commises. En outre, chaque décision doit pouvoir être appuyée par une connaissance formalisée, validée et capitalisée sous une forme aisément exploitable par les décideurs. Sur la figure suivante (figure 1.1), cette problématique est illustrée à l'aide d'un modèle à trois niveaux : Processus, Outils, Expériences/Connaissances.

Mes activités de recherche ont contribué de manière simultanée aux trois niveaux *Processus*, *Outils* et *Expériences/Connaissances* tout en participant au développement du processus global de retour d'expérience qui s'opère de manière transversale sur les niveaux. La problématique globale ainsi que le contexte dans lequel elle a été définie sont décrits dans les sections suivantes en parcourant les trois niveaux *Processus*, *Outils* et *Expériences/Connaissances*.

1.4.1 Le niveau Processus

Le processus permettant de fédérer nos travaux est le processus d'ingénierie système. Parmi les nombreux processus standards d'ingénierie système existants, le processus décrit dans SEBoK (System Engineering Book of Knowledge) [Pyster and Olwell, 2013] propose d'unifier les représentations existantes (ANSI-EIA 632 [Martin, 2000], ISO/IEC 15288 [ISO15288, 2008], INCOSE [Haskins, 2011],

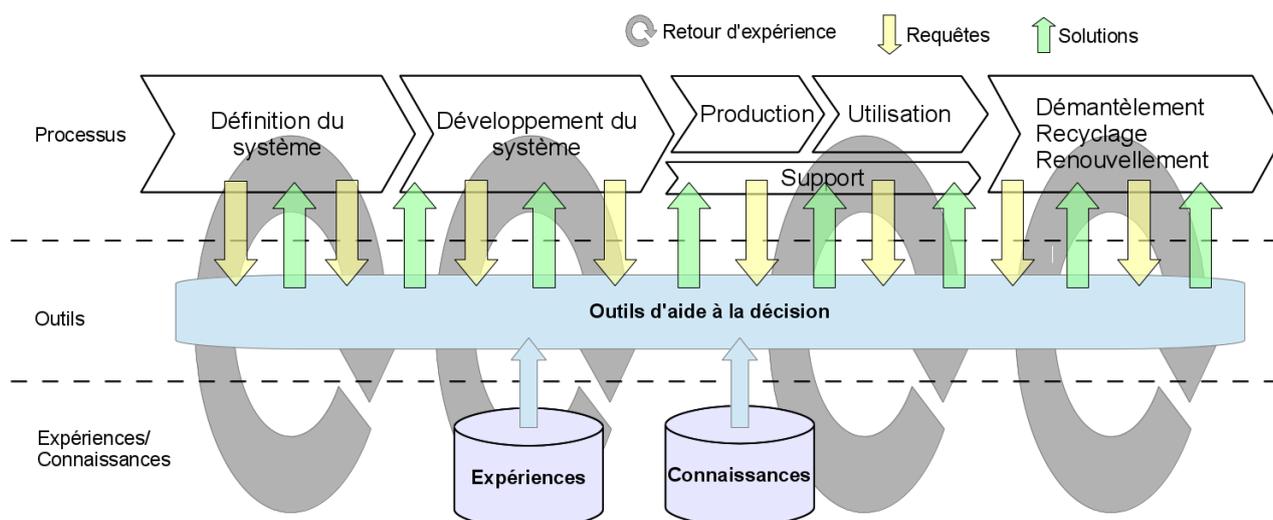


FIGURE 1.1 – Représentation schématique de la problématique développée

etc.). Nous nous inspirons donc de ce standard afin d'illustrer le contexte général de travail. Cette représentation n'est pas unique et, par exemple, dans [Scaravetti, 2004], un panorama de différents processus de conception, industriels ou académiques est proposé. Les activités permettent de définir le système, de le concevoir, de le produire, de supporter sa production (et son utilisation), de l'utiliser et finalement de le démanteler, le recycler et le renouveler. Les activités, mises en œuvre selon le cycle de développement choisi (cycle en V, activités itératives, concourantes, etc.) sont globalement décrites ci-dessous :

- **Définition du système** : il s'agit de définir la mission et les besoins auxquels le futur système devra répondre. L'espace dans lequel l'activité d'ingénierie va être réalisée est défini. Les besoins exprimés par les parties prenantes (souvent vagues, ambigus et qualitatifs - par exemple : « *le véhicule doit être léger* ») sont élicités et priorisés afin de les transformer en besoins formalisés, clairs, concis et vérifiables [Faisandier, 2012].
- **Développement du système** : il s'agit de l'activité qui permet de décrire en détail le système permettant de satisfaire les exigences. Il s'agit donc de l'activité de conception proprement dite. Cette activité se partage entre la réalisation des activités de caractérisation des exigences système, de l'architecture logique, de l'architecture physique et de l'analyse des éléments obtenus. Les besoins, formalisés à l'étape précédente sont analysés finement afin de définir les exigences fonctionnelles, de performances, de sécurité, de fiabilité, etc. L'architecture logique permet de décrire les principes de fonctionnement du système associé ainsi que son architecture (décomposition en sous ensembles). L'architecture physique est en adéquation avec l'architecture logique et permet la description des composants et/ou interfaces physiques. L'activité d'analyse permet d'évaluer quantitativement les choix réalisés par rapport aux exigences techniques.
- **Production du système** : cette activité permet de créer et tester des versions du système qui a été spécifié à l'étape précédente. Elle est constituée des sous activités suivantes : au plus bas niveau, les sous-systèmes sont implémentés (production, approvisionnement ou sous-traitance). Leur intégration permet de les assembler. La vérification et la validation sont réalisées afin de s'assurer que le système obtenu est cohérent par rapport aux architectures logiques et physiques

ainsi que par rapport aux exigences. La vérification est réalisée tout au long du cycle de vie. Elle permet de s'assurer, par l'exploitation de preuves objectives (tests, mesures, analyses, calculs, etc.), que les exigences spécifiées ont été respectées. La validation est réalisée conjointement. Il s'agit, pour chaque activité réalisée, d'analyser les entrées et les sorties afin de s'assurer que les résultats fournis sont bien ceux attendus compte tenu des éléments fournis en entrée.

- **Utilisation du système** : après une phase transitoire de tests de fiabilité et de basculement ancien système / nouveau système (le déploiement), le système est mis en exploitation. Toutes les fonctionnalités développées sont mises en œuvre. Cette exploitation est aidée par l'activité de Support.
- **Support** : il s'agit de réaliser les activités suivantes :
 - former les utilisateurs et le personnel du support à l'exploitation du système et à son contrôle,
 - mesurer en temps réel les performances effectives du système par rapport aux spécifications. Selon les mesures obtenues, des actions peuvent être recommandées. Il s'agit donc d'une activité de supervision,
 - la collecte et l'analyse des données sur les défaillances et les actions correctives. Ces analyses peuvent mener à recommander des modifications sur le système (modifications/changements de composants par exemple). Des activités de maintenance correctives et préventives peuvent également être déclenchées.

Bien que l'activité de support soit décrite dans le standard SEBoK comme venant en aide à l'activité d'utilisation du système uniquement, dans notre approche, nous considérons que le support intervient également lors de la phase de production. En effet, dans nos travaux, nous instrumentons l'activité de support en la rapprochant d'un processus de résolution de problèmes (voir section 1.4.2.5). Les problèmes pouvant intervenir tout au long du cycle de vie, la portée de l'activité support peut également être étendue sur le cycle de vie. Cependant, dans nos travaux, nous ne considérons que le support à la production et à l'utilisation.

- **Démantèlement, Recyclage et renouvellement** : ces activités sont réalisées en fin de vie du système lorsque celui-ci devient obsolète ou non-économiquement rentable.

Ces activités d'ingénierie système sont très fortement corrélées à d'autres processus supports (par exemple la gestion de projet, la gestion des risques, etc.). Une partie de notre problématique a donc consisté à mettre en interaction le processus d'ingénierie système avec, selon des points de vue complémentaires principalement définis par les activités des laboratoires LESTER et LGP, les trois processus suivants : le processus de pilotage d'un système automatisé, le processus de planification de projet et le processus de résolution de problèmes. Ces trois processus sont illustrés sur la figure 1.2 et décrits ci-après. Pour chacun, une part de la problématique a consisté à étudier les liens avec le processus d'ingénierie système afin de proposer des modèles adaptés et faire en sorte d'une meilleure intégration grâce aux outils développés au niveau *Outils* et en se basant sur le niveau *Expériences/Connaissances*.

1.4.1.1 Le point de vue pilotage

Le premier point de vue, le plus ancien, est celui développé au laboratoire LESTER de Lorient entre 2001 et 2004. Il s'agit de mettre en perspective et de formaliser des liens entre les activités de conception de systèmes de production automatisés (considérés comme des systèmes à événement discrets), celles de support à l'utilisation et celle de pilotage ou, plus particulièrement, de contrôle-commande afin d'aider à reconfigurer un système automatisé en présence de dysfonctionnements (liens

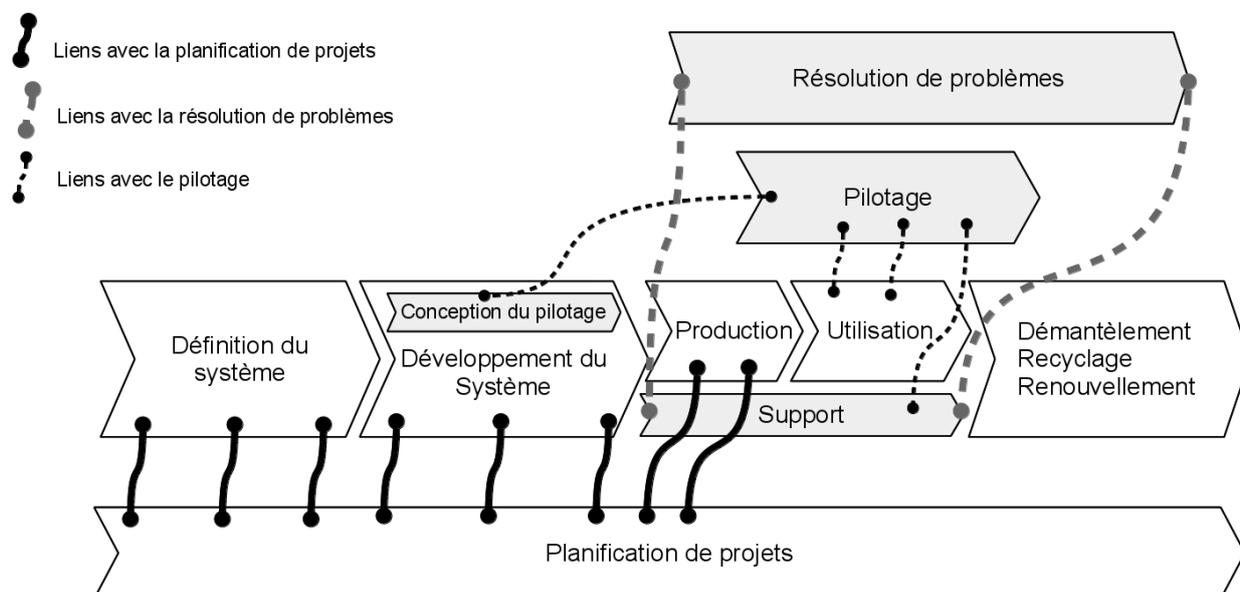


FIGURE 1.2 – Contributions au niveau Processus

en trait pointillés fins - figure 1.2). Les applications concernées par cet activité de recherche sont les systèmes transitiques (systèmes de transport automatisés).

De nombreuses études ont été menées ces vingt dernières années sur la notion de pilotage d'un système de production. Selon D. Trentesaux [Trentesaux, 2002], *le pilotage consiste à décider dynamiquement des consignes pertinentes à donner à un système soumis à perturbation pour atteindre un objectif donné décrit en termes de maîtrise de performances*. Dans son dictionnaire, l'association APICS [Apics, 2014] parle de « Production Activity Control » (PAC), la fonction qui consiste à faire cheminer et à répartir le travail à exécuter dans les unités de production. Piloter un système peut être considéré comme la mise en œuvre des activités de conduite et de commande. La conduite est la fonction décisionnelle qui donne les ordres, selon l'ordonnancement des tâches à réaliser ; la commande exécute les ordres décidés par la conduite et lui retourne les données de suivi. Dans notre travail, les systèmes considérés sont des systèmes automatisés de production pour lesquels on s'intéresse à la commande. La commande de tels systèmes est mise en œuvre à l'aide d'Automates Programmables Industriels (API) chargés d'exécuter des programmes développés en phase de conception système en utilisant des langages adaptés (grafcet, ladder, etc.). Ainsi, nous considérons un pilotage « temps réel » ou opérationnel à horizon très court terme. Un aspect de ce type de pilotage que nous considérons particulièrement dans nos travaux est la *reconfiguration*. Elaborée à partir de travaux en sûreté de fonctionnement des systèmes informatiques [Laprie, 1995] et de la théorie du contrôle [Patton and Chen, 1994, Frank, 1996], cette activité fait partie de la *tolérance aux fautes* [Berruet et al., 2000]. Il s'agit d'une méthode active mise en œuvre en phase d'exploitation du système. Il est nécessaire de confiner le problème afin d'éviter que ses effets ne se propagent, de permettre au système de reprendre une activité et de le reconfigurer pour absorber la perte de certaines fonctionnalités. Notre problématique s'attaque particulièrement à ce dernier point. Un processus de reconfiguration est mis en œuvre dès la détection d'un problème dans le système automatisé durant la

phase d'utilisation. Il consiste en une réorganisation à la fois de la structure matérielle de l'équipement et de sa commande [Berruet et al., 2000, Toguyéni et al., 2003]. L'objectif est de permettre au système de recouvrer un comportement qui lui permettra de continuer à poursuivre la mission pour laquelle il a été conçu, c'est-à-dire la réalisation des performances attendues. La reconfiguration est donc mise en œuvre par le processus de support au sein du processus d'ingénierie système. Pour nos applications en transitique, reconfigurer un système de production automatisé consiste à trouver (de façon automatique) une alternative au cheminement des produits dans le système en cas de problèmes et de mettre en œuvre cette alternative.

Dans une approche de *codesign* telle que développée au laboratoire LESTER où une architecture électronique matérielle est conçue conjointement avec l'architecture logicielle [Balarin et al., 1997], [Ernst, 1998], nous avons appliqué ces principes à la conception de systèmes automatisés de production [Mouchard et al., 2000], [Mouchard, 2002], [Coudert et al., 2002] (B.26). Dans cette approche, la partie commande du système automatisé est conçue conjointement avec sa partie opérative. Il est donc primordial d'être en mesure de vérifier et valider au plus tôt les capacités du système piloté et, notamment, ses aptitudes à la reconfiguration. En outre, ce processus de pilotage étant mis en œuvre durant la phase d'exploitation, il est également opportun de faire interagir pilotage, activité d'utilisation et activité support à l'utilisation.

Dans les phases amont d'ingénierie, le système conçu avec sa commande peut ainsi être vérifié par rapports aux besoins exprimés (par exemple : fonctions, vitesse, taux de service, etc.). Des méthodes de vérification formelle [Amagbègnon et al., 1995] peuvent être utilisées mais, également, des méthodes de simulation dans lesquelles des scénarios de pilotage peuvent être simulés [Kindler et al., 2004] (A.6), [Mirdamadi, 2009]. En outre, en phase d'utilisation du système, le processus de support, aidé par le processus de pilotage, doit être en mesure de mettre en œuvre la reconfiguration en cas de problèmes. L'approche développée suite à cette mise en interaction des processus permet d'outiller la reconfiguration grâce aux systèmes multiagents (voir section 1.4.2.1).

1.4.1.2 Le point de vue planification de projet

Un second point de vue, développé ensuite au laboratoire LGP, dans des travaux autour du projet ANR ATLAS, consiste à mettre en synergie le processus de planification de projet d'ingénierie système avec le processus d'ingénierie système lui-même. Le cadrage des activités d'ingénierie système par des processus de management de projet est absolument nécessaire comme précisé dans [Ferris, 2008], [Sharon et al., 2011], [Locatelli et al., 2013] ou [Towhidnejad et al., 2013][Towhidnejad et al., 2013]. Les approches d'ingénierie système préconisent de mettre en œuvre un système de management des activités à réaliser afin d'une part de maîtriser simultanément le respect des budgets, des délais et des exigences techniques et, d'autre part, d'anticiper les décisions importantes.

Le Project Management Institute (PMI) offre dans l'ouvrage Project Management Book of Knowledge, [PMBok, 2013] une description exhaustive de la gestion de projets. Les processus sont regroupés en cinq catégories :

- *Initiating Process Group* : ces processus permettent de définir un nouveau projet ou une nouvelle phase dans un projet existant et d'obtenir les autorisations nécessaires,
- *Planning Process Group* : ce groupe permet de définir la portée du projet (*scope*), d'affiner les objectifs et de planifier le cours des actions à mener pour satisfaire ces objectifs,
- *Executing Process Group* : ce groupe permet de réaliser les activités planifiées,

- *Monitoring and Controlling Process Group* : ces processus permettent la surveillance du projet afin d'identifier les changements requis et d'initialiser les premières modifications,
- *Closing Process Group* : ce groupe permet la clôture du projet.

Dans nos travaux, nous nous intéressons particulièrement au processus standard de planification de projet (*Project Time Management*) proposé par le PMI dans [PMBok, 2013], page 146. Ce processus se décompose en sept activités :

- *Plan Schedule Management* : l'activité préparatoire permettant d'établir la politique, les procédures et la documentation utiles pour les autres activités,
- *Define Activities* : l'activité de recensement et de caractérisation des activités spécifiques à réaliser pour obtenir les livrables du projet,
- *Sequence Activities* : l'activité qui permet d'identifier les contraintes de précédences entre activités à planifier,
- *Estimate Activity Resources* : l'activité permettant l'estimation de la quantité et du type de ressources requises,
- *Estimate Activity Durations* : l'activité permettant l'estimation des durées des activités selon les ressources envisagées à l'étape précédente,
- *Develop Schedule* : l'activité permettant de générer une solution de planification des activités,
- *Control Schedule* : l'activité permettant de contrôler l'avancement des activités et de gérer les changements nécessaires.

Les interactions entre le processus de gestion de projet et celui d'ingénierie système ont été étudiées et critiquées dans la littérature comme par exemple dans [Eisner, 1997], [Forsberg et al., 2005] [Forsberg et al., 2005], [Sharon et al., 2011], [Pyster and Olwell, 2013]. Ces auteurs ont identifié des problèmes de synchronisation entre processus ainsi que de partage de responsabilités (gouvernance) entre le gestionnaire de projet et le gestionnaire du processus d'ingénierie système. Par exemple, dans [Forsberg et al., 2005], les auteurs argumentent le fait qu'un équilibre doit être maintenu entre gestion des exigences techniques et gestion de projet. Le budget et les délais alloués au projet doivent permettre la satisfaction des exigences techniques. Inversement, la satisfaction des exigences techniques doivent permettre de maîtriser le budget et les délais. Des projets sans concordance entre processus d'ingénierie système et processus de gestion de projet sont voués à l'échec. Dans les standards tels ceux proposés par le PMI [PMBok, 2013], la planification intervient tardivement lorsque l'architecture des artefacts à concevoir est relativement bien connue. Dans le processus de planification, la définition des activités est en effet réalisée à partir de l'architecture WBS (*Working Breakdown Structure*). Une telle démarche séquentielle peut entraîner une détection tardive des problèmes lors de la conception entraînant ainsi des délais importants ainsi que de fréquentes remises en causes. Dans nos travaux, nous considérons que le processus de conception (ou, plus généralement, le processus d'ingénierie système) et le processus de planification de projet sont intimement liés. La connaissance de l'architecture du système que l'on cherche à concevoir permet de réaliser la planification mais, inversement, la connaissance des activités à planifier dépend du travail de conception lui-même. Dans la pratique, il s'avère que cette exigence d'interaction des processus (que nous appelons *couplage* dans nos travaux) et de maintien d'équilibre est très peu outillée et satisfaite. Dans le cadre de la thèse de Joël Abeille [Abeille, 2011] (PhD.2) liée au projet ANR ATLAS, nous avons mené une enquête auprès d'une quinzaine d'industriels du pôle de compétitivité Aerospace Valley intervenant dans le domaine de l'ingénierie et des services [Abeille et al., 2009] (C.5), [Abeille, 2011] (PhD.2). Toutes les entreprises interviewées dé-

clarent coupler la conception de systèmes à la planification de projet. Cependant, la plupart rencontre des problèmes de gouvernance (82%). Soit le planificateur prend le pas sur l'ingénieur système, soit c'est l'inverse. Les conséquences sont que l'un subit les effets des choix réalisés par l'autre, bien souvent trop tardivement pour y remédier. Il s'avère en outre que peu d'entreprises (22%) utilisent des outils de travail collaboratif. Les autres formalisent les échanges sous forme de procédures (45%) ou, plus simplement, font confiance aux acteurs humains (33%). Dans la pratique, les solutions existantes assurant un couplage de la conception et de la planification sont, pour la moitié des entreprises interrogées, des réunions de type revues de projet, revues de conception, vérification de conceptions, etc. Le quart des entreprises se base sur des standards normatifs tels que EIA-632, INCOSE, ISO, etc. Les résultats complets de cette enquête sont détaillés en annexe de la thèse de Joël Abeille [Abeille, 2011] (PhD.2).

Une part de notre contribution est ainsi de permettre un fonctionnement en synergie du processus d'ingénierie système et du processus de planification de projet. Ceci est réalisé en définissant et en outillant des points de synchronisations et d'échanges (liens en traits pleins - figure 1.2) entre eux. Ainsi, chaque activité d'ingénierie est planifiée en liaison directe avec les choix d'ingénierie système. Au plus tôt dans le processus d'ingénierie système, ceci permet de réaliser des choix guidés de planification sous contraintes de délais et de budget (choix de ressources de conception ou de production, durées des activités, contraintes de précédences entre activités, choix de sous-traitants, affectation des ressources et compétences requises, etc.) conjointement à ceux de conception (choix de technologies et de fournisseurs, choix de développement de solutions concurrentes, choix de sous-traitance de certaines études, choix de décomposition en sous-systèmes, choix technologiques, etc.). Des gains significatifs peuvent être obtenus en évitant de fréquentes remises en causes des décisions et un allongement des temps de cycles, ceci à condition d'être en mesure d'anticiper suffisamment tôt les alternatives et de faire les choix pertinents.

Ce couplage du processus d'ingénierie système et du processus de planification de projet a justifié le besoin d'outils d'aide à la décision dont la caractérisation globale est décrite dans la section liée aux *Outils*, paragraphe 1.4.2, page 46.

1.4.1.3 Le point de vue résolution de problèmes

Le troisième point de vue, développé au laboratoire LGP, consiste à faire interagir l'activité de *support à la production* avec le processus de *résolution de problèmes* (voir les liens en traits pointillés gras - figure 1.2). La résolution de problèmes est une thématique abordée depuis de nombreuses années par le laboratoire LGP, associée au retour d'expérience. Les outils développés dans l'équipe SDC concernent l'intégration du retour d'expérience à la résolution de problèmes [Rakoto et al., 2002, Clermont et al., 2007], l'aide à la formalisation des analyses dans la résolution de problèmes industriels [Jabrouni et al., 2011, Jabrouni et al., 2013], l'intégration du retour d'expérience dans le PLM (Product Life Cycle Management) [Bertin, 2012], l'aide à la maintenance [Kamsu-Foguem and Noyes, 2013]. Dans ces approches, la dynamique de la résolution de problèmes, l'un des processus clé de la qualité, est exploitée afin de développer le retour d'expérience. La résolution de problèmes étant aujourd'hui incontournable dans les entreprises, celles-ci déploient des processus standards tels que PDCA, DMAICS, 8D [AIAG, 2012]. Dans les travaux du LGP, chaque résolution de problème est une expérience qu'il est opportun de capitaliser afin d'être en mesure de la réutiliser lors de futures résolutions en contexte similaire. La figure 1.3 illustre le lien entre processus standards de résolution de problèmes et retour d'expérience [Kamsu-Foguem et al., 2008](A.4). Nous considérons en effet qu'un processus

de retour d'expérience est mis en œuvre lors de l'apparition d'un événement de type « problème ». Ce processus est composé de quatre activités qui sont la définition du contexte, l'analyse du problème, la définition / mise en œuvre de solutions et la construction de connaissances issues de l'expérience.

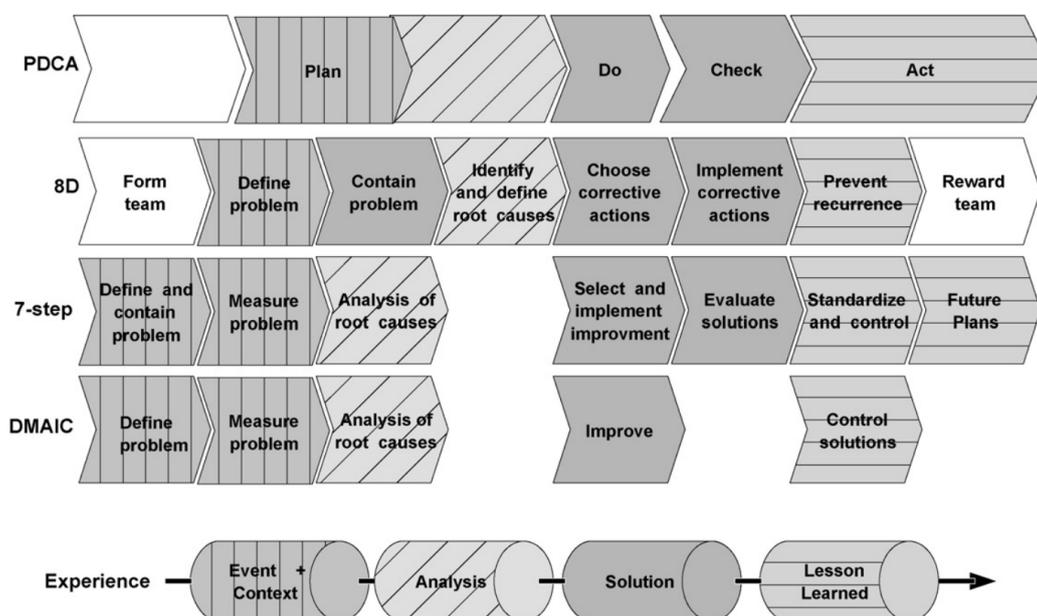


FIGURE 1.3 – Processus standards de résolution de problèmes et retour d'expérience

Selon cette approche, pour notre propre problématique, il s'agit de définir des modèles adaptés pour les expériences (voir section 1.4.3) ainsi que des outils permettant d'identifier les expériences passées pouvant être exploitées dans le contexte courant (voir section 1.4.2).

D'autre part, le déploiement de processus de résolution de problèmes dans un contexte distribué a également été abordé. Dans ce cas, la détection d'un problème sur le système survenu dans un contexte particulier entraîne sa résolution non plus centralisée mais distribuée. Différentes entreprises partenaires sont impliquées et il s'agit de les identifier et d'encadrer le processus de résolution. Le travail d'analyse mené par Juan Romero dans sa thèse (PhD.4) a permis d'identifier la problématique suivante. Le processus de résolution de problèmes doit être distribué car ses causes peuvent être distribuées sur l'ensemble de la chaîne. Il s'agit donc de les caractériser par des analyses adéquates et de les éradiquer en mettant en œuvre des solutions adaptées à chaque partenaire impliqué.

En outre, les analyses et solutions mises en œuvre peuvent avoir un impact sur l'activité de conception système en requérant des modifications [Romero et al., 2012a] (B.4). Ceci justifie ainsi une interaction étroite entre le processus de résolution de problèmes et celui d'ingénierie système.

1.4.2 Le niveau Outils

Le second niveau de la figure 1.1 correspond aux outils d'aide à la décision qui permettent d'aider à la réalisation des activités d'ingénierie système, éventuellement couplées à d'autres activités de pilotage, de planification de projet et de résolution de problèmes. L'objectif global de ces outils est de permettre aux décideurs d'être guidés vers des choix pertinents, le cas échéant optimaux, au plus tôt dans le processus d'ingénierie afin d'éviter les erreurs, de maîtriser les délais et les coûts, de bénéficier des expériences passées et d'exploiter la connaissance formalisée de l'entreprise. La **réutilisation d'acquis** est ainsi la clé de voûte des approches développées. Elles consistent en des mécanismes intégrés basés sur des techniques d'intelligence artificielle et exploitant expériences et connaissances.

Les outils, méthodes et approches que nous avons développés concernent :

- la reconfiguration de systèmes automatisés,
- la synchronisation du processus d'ingénierie système avec celui de planification de projet,
- l'optimisation multicritères guidée par les connaissances,
- la réutilisation d'expériences et de connaissances pour l'aide à la décision,
- la résolution distribuée de problèmes.

La problématique globale abordée dans le développement de ces outils est exprimée dans les sections 1.4.2.1 à 1.4.2.4.

1.4.2.1 La reconfiguration de systèmes automatisés de production

Cette problématique développée au laboratoire LESTER à Lorient s'inscrit dans un contexte global de conception et d'exploitation de systèmes automatisés de type « systèmes transitiques » avec la prise en compte d'exigences de sûreté de fonctionnement. Dans ce contexte, nous nous sommes intéressés notamment à la mise en œuvre du processus de reconfiguration d'un système à événements discrets. Les systèmes à événements discrets tels qu'on les trouve dans le secteur de la production et particulièrement les systèmes transitiques (composés de convoyeurs complexes, d'ascenseurs, de trieurs, de chariots filo-guidés) constituent le domaine principal d'application. Des travaux réalisés en amont de mon intégration en 2001 ont conduit à formaliser un processus de conception allant des spécifications à l'intégration [Mouchard et al., 2000], [Mouchard, 2002]. L'approche de modélisation et d'analyse retenue déroule le flot en partant des spécifications jusqu'à l'intégration en conservant une approche par composants. La partie opérative et la partie commande d'un composant sont développées conjointement [Coudert et al., 2002] (B.26). La complexité de la conception de tels systèmes est appréhendée par l'approche par composant (bottom-up). Elle permet de réaliser au plus tôt une bonne adéquation entre l'architecture logique (ou fonctionnelle) et l'architecture physique. Ces systèmes, une fois déployés dans une entreprise se doivent d'être flexibles, robustes, facilement pilotables, modulaires et tolérants aux fautes [Kindler et al., 2004] (A.6). C'est donc dans ce contexte que notre problématique se dessine : le besoin d'un outil d'aide à la décision permettant de reconfigurer un système transitique. Pour cela, l'approche par systèmes multiagents a été retenue.

En effet, suite aux travaux sur l'approche modulaire par composants, il est apparu clairement que le concept de composant défini par l'équipe était très proche du concept d'agent, seuls manquaient les aspects « entité autonome » et « intelligence » dans les composants, deux qualités essentielles pour avoir un système modulaire, flexible et réactif et donc aisément reconfigurable. Au lieu de considérer l'approche comme centralisée (modèle du système obtenu par agrégation de composants), nous avons considéré que chaque entité était autonome et distribuée. Une entité est une partie physique du système

transitique avec un contrôleur associé et communique avec les autres par un médium adapté. Chaque entité est modélisée par un agent (agent transitique), l'ensemble des agents présents et en interaction forme le modèle global du système transitique. La synchronisation se fait alors par envois de messages. Chaque produit dans le système est modélisé par un agent (*Agent Produit*). Chaque agent transitique dispose d'une connaissance formalisée à l'aide d'un graphe regroupant toutes les opérations potentiellement réalisables par la partie physique qu'il modélise et les relations de précédence entre elles (Graphe d'Accessibilité Opérationnel - GAO [Berruet et al., 2000]). Chaque nœud représente une opération, chaque arc une relation de précédence entre deux opérations. En cas de problème survenant sur une partie du système transitique, un graphe étant modifié, le système multiagent est chargé de trouver un nouveau chemin dans le graphe global. Pour cela, l'algorithme des fourmis (*Ant Colony Optimization* [Dorigo, 1992, Dorigo and Stützle, 2004]) est utilisé. Une colonie de fourmis est chargée de trouver un nouveau chemin (optimal) qui permettra au produit de continuer à circuler dans le système transitique et d'être dirigé vers les postes requis. Bien sûr, l'approche fonctionne à condition de disposer de redondances pour effectuer un transfert de produits. Ces travaux sont décrits dans le chapitre 2, page 61.

1.4.2.2 La synchronisation du processus de planification de projet avec celui d'ingénierie système

Le couplage du processus d'ingénierie système avec celui de planification de projet nécessite de mettre en œuvre des outils permettant une bonne synchronisation et des échanges d'informations entre décideurs (voir section 1.4.1.2, page 42). Dans les travaux menés dans la thèse de Joël Abeille (PhD.2) autour du projet ANR ATLAS, nous avons étudié ces liens afin de proposer un outil assurant la synchronisation des processus. Ces liens sont appelés *couplages* dans nos travaux. Nous avons uniquement considéré les couplages entre i) les activités de conception/production de systèmes du processus d'ingénierie système (voir figure 1.1) et ii) les activités de planification de projet. Ainsi, pour notre problématique, nous avons défini les besoins de couplage suivants :

- le besoin d'un *couplage informationnel* : l'outil assurant le couplage informationnel doit permettre aux acteurs des processus d'ingénierie et de planification de projet de définir les informations de manière intégrée. L'outil doit donc exploiter une *connaissance méthodologique* formalisée sous forme de modèle générique à base d'entités de conception et d'entités de planification. Ce modèle doit garantir que l'existence des unes est bien liée à l'existence des autres. De cette manière, une structure de système doit nécessairement être liée ou couplée à une structure de projet. Dès l'expression d'exigences pour un nouveau système, l'outil doit instancier ce modèle afin que les acteurs d'ingénierie système puissent renseigner les données en cohérence avec ceux de planification de projet,
- le besoin d'un *couplage comportemental* : l'outil doit être en mesure de mettre en œuvre un processus intégré et générique de conception / planification garantissant une bonne intégrité des informations en utilisant le modèle du couplage informationnel. Ce processus permet de garantir que les informations sur les entités couplées sont renseignées au bon moment avec une parfaite cohérence en permettant aux décideurs, en conception et en planification, de prendre leurs décisions de manière concertée. Ce processus générique constitue également une *connaissance méthodologique* exploitable par les outils.

Ces outils, développés dans la thèse de Joël Abeille (PhD.2), sont décrits dans le chapitre 3, section 3.2, page 72. La problématique globale concernant les connaissances méthodologiques est exprimée

dans la section Expériences/Connaissances (voir section 1.4.3). La figure 1.4 illustre ces deux outils intercalés entre processus et connaissances.

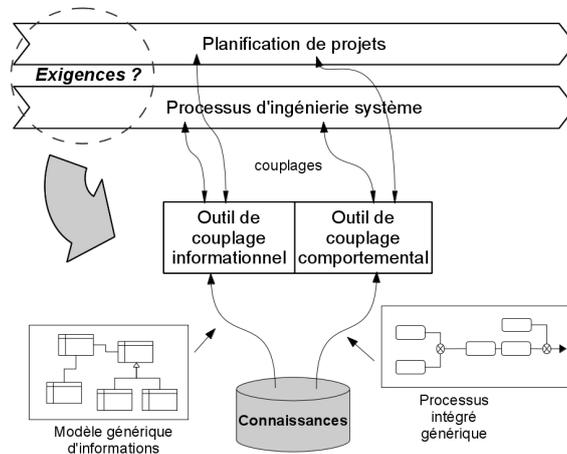


FIGURE 1.4 – Illustration des outils de couplage informationnel et de couplage comportemental

1.4.2.3 L'optimisation multicritère guidée par les connaissances

Cette problématique concerne le besoin d'un outil permettant la recherche de solutions optimales correspondant à un problème multicritère intégrant à la fois la dimension « planification de projet » et la dimension « ingénierie système ». Cette problématique apparaît dans des phases amont de l'ingénierie système dans le cas où différentes possibilités d'architectures du système sont connues ainsi que différentes alternatives de production, acquisition ou sous-traitance. Par exemple, dans une phase de réponse à appels d'offres, il peut s'avérer que, dans le système à concevoir, une part importante sera réutilisée (90%), le reste développé (10%). La plupart des choix possibles étant connus, au moins à un niveau global, il peut être avantageux d'optimiser les 90% afin d'offrir une réponse réalisable et optimale. Dans nos travaux, nous formalisons le processus à l'aide d'un graphe orienté [Pitiot, 2009] (PhD.1). Ce graphe représente un ensemble d'activités, séquentielles et/ou concourantes, liées par des contraintes de précédence, et pouvant nécessiter des ressources pour leur réalisation. De plus, l'ensemble des choix qui peuvent être faits lors de la réalisation d'un projet d'ingénierie système sont également formalisés. Ce graphe (appelé *graphe de projet*) peut être considéré comme un couplage permettant l'optimisation car l'ensemble des choix de conception, de réalisation, de planification sont représentés. Les nœuds représentent des OU exclusifs, des ET ou encore des activités. Les arcs représentent les contraintes de précédences. Ce modèle a été développé par Samuel Rochet [Baron et al., 2004]. Un exemple de graphe est illustré sur la figure 1.5. Au sein d'un graphe, un scénario correspond à un ensemble de choix et donc à l'enchaînement d'une série d'activités. Dans notre approche, un scénario est considéré comme étant une expérience. Une fois construit par l'outil de résolution, un scénario cohérent peut être ensuite réalisé passant ainsi de l'état *d'expérience simulée* à celui *d'expérience réalisée*. A chaque choix correspondent des valeurs de critères, les critères pouvant être multiples. Dans nos travaux, nous nous sommes limités à deux critères (coût et délai).

Résoudre notre problème consiste à obtenir, dans un « délai raisonnable » pour l'utilisateur, un panel de solutions Pareto-optimales (un ensemble de scénarios) parmi lesquelles l'utilisateur pourra

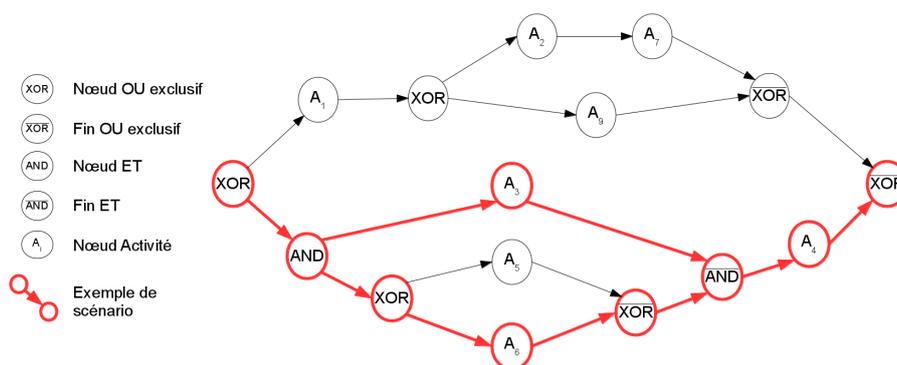


FIGURE 1.5 – Exemple de graphe de projet

effectuer un choix. Lorsque le problème est multiobjectif, une solution unique optimisant tous les objectifs simultanément n'existant pas [Zhou et al., 2011], on recherche un ensemble de solutions Pareto-optimales [Stadler, 1979] exploitables par un décideur. En raison du caractère NP-complet du problème, des méthodes de type méta-heuristiques peuvent être utilisées efficacement. Les méta-heuristiques sont des algorithmes conçus pour résoudre approximativement un large panel de problèmes d'optimisation « difficiles ». Parmi ces algorithmes, on peut citer (voir [Boussaïd et al., 2013] ou [Siarry, 2014] pour un panorama plus complet) le recuit simulé [Kirkpatrick, 1984], la recherche Tabou [Glover, 1994], les algorithmes évolutionnaires [Zhou et al., 2011] ou génétiques [Goldberg, 1989], les colonies de fourmis [Dorigo, 1992], [Dorigo and Stützle, 2004], l'optimisation par essais particuliers [Kennedy and Russell, 1995], etc.

La méthode de résolution retenue pour nos travaux est un Algorithme Évolutionnaire (AE) dont le principe est représenté sur la figure 1.6. Dès l'initialisation, une population d'individus correspondant à des solutions est générée aléatoirement. Des opérateurs évolutionnaires aléatoires permettent d'associer deux individus, de croiser leurs gènes, d'opérer des mutations menant à une nouvelle population d'individus dont la performance (*fitness*) est évaluée (vis-à-vis des objectifs). Les individus Pareto-optimaux sont archivés. Certains individus sont alors sélectionnés et ce cycle est réitéré jusqu'à l'atteinte d'un critère d'arrêt.

Les opérateurs évolutionnaires utilisés dans un algorithme évolutionnaire standard permettent de bâtir une population de solutions de manière « aveugle » de par les choix aléatoires qu'ils réalisent. Lors de la réalisation d'un cycle, une nouvelle population d'individus est obtenue par croisement et mutation des gènes de leurs parents, eux même sélectionnés aléatoirement, sans visibilité sur les effets. Ceci peut donc conduire à générer des individus peu performants vis-à-vis des objectifs. Afin d'améliorer les performances, notre méthode est en mesure d'exploiter les expériences et connaissances qui ont été capitalisées. Celles-ci doivent permettre de guider le processus de résolution vers les zones intéressantes de l'espace de recherche, c'est-à-dire les zones pour lesquelles la valeur des objectifs correspondant aux solutions est intéressante, voire optimale. L'idée développée dans ces travaux est donc de biaiser les opérateurs évolutionnaires à l'aide des connaissances afin de guider l'algorithme vers la génération d'individus performants. Des connaissances expertes peuvent également être injectées afin de mieux guider l'algorithme.

Les expériences peuvent être des *expériences réalisées* capitalisées lors de la réalisation des activités concernées mais aussi des *expériences simulées* obtenues en cours de résolution. Les connaissances sont obtenues par un processus d'apprentissage à partir des expériences disponibles puis capitalisées

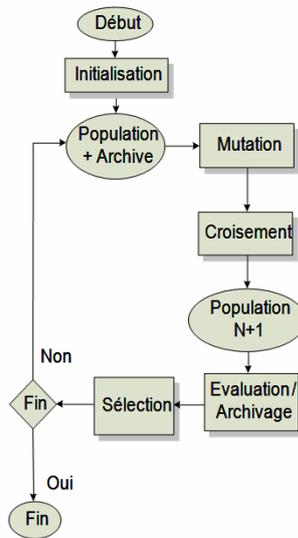


FIGURE 1.6 – Principe d’un algorithme évolutionnaire

grâce à un modèle à base de réseau bayésien (voir section 1.4.3). Cette approche est représentée sur la figure 1.7. Ces travaux correspondent à la thèse de Paul Pitiot soutenue en 2010 [Pitiot, 2009] (PhD.1) et sont décrits de manière détaillée dans la section 3.3 du chapitre 3.

1.4.2.4 L’exploitation d’expériences et de connaissances pour l’aide à la décision

Un autre volet de la problématique globale que nous avons développée dans nos travaux concerne la définition d’outils permettant l’exploitation conjointe d’expériences et de connaissances pour aider les prises de décisions des acteurs d’un processus d’ingénierie système. Trois cas sont explorés : i) le cas où les connaissances sont des *connaissances métier* et sont exploitées seules, ii) le cas où les connaissances permettent d’aider à exploiter/capitaliser des expériences, iii) le cas où les connaissances dépendent du contexte d’exploitation et sont aidées par les expériences.

Cas 1 : les connaissances sont formelles, explicites et précises. Il s’agit de connaissances métier, c’est-à-dire construites par des experts d’un domaine particulier. Leur exploitation opérationnelle consiste alors à consulter la base de connaissances afin d’en extraire des éléments qui pourront être utilisés directement comme guides. Il peut s’agir de règles, d’algorithmes, de caractéristiques d’objets, d’associations possibles ou interdites, de normes, de conseils, etc. Ces éléments peuvent être formalisés et structurés afin d’être facilement et directement exploitables par l’utilisateur. Dans nos travaux, nous avons bâti nos outils en se basant sur des ontologies de concepts. Cette partie de nos travaux est décrite dans le chapitre 4, section 4.2.

Cas 2 : l’exploitation d’expériences consiste ici, suite à l’expression d’un problème ou d’une requête par un décideur, à identifier dans la base d’expériences celles qui peuvent potentiellement apporter des éléments de réponse, à sélectionner celles qui sont compatibles, à les adapter au nouveau contexte, à les réutiliser et, in fine, à les capitaliser dans la base d’expériences lorsqu’elles s’avèrent efficaces en répondant au problème. Il s’agit donc d’une problématique de Raisonement à Partir de Cas (RàPC) [Aamodt and Plaza, 1994, Kolodner, 1993]. Dans cette approche, un nouveau problème (un cas cible) est résolu en réutilisant des solutions obtenues pour de précédents problèmes (cas sources). Ceci

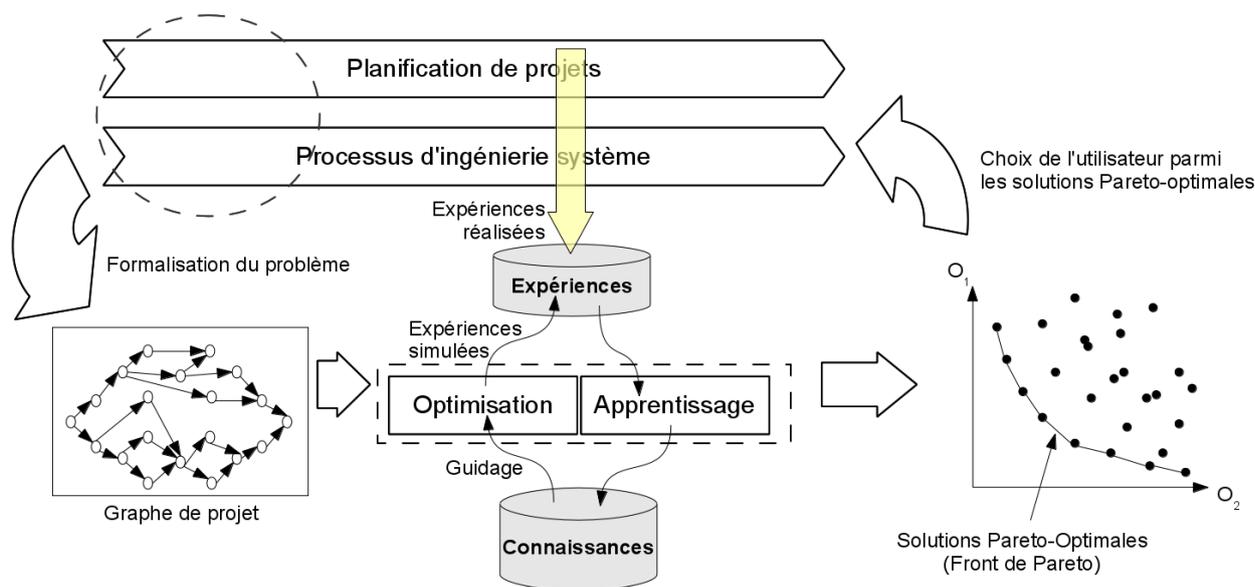


FIGURE 1.7 – Principe de l'optimisation guidée par les connaissances

Il passe par l'identification de caractéristiques similaires. Il peut s'avérer délicat de définir le problème précisément et sans ambiguïtés notamment lors des phases amont du processus d'ingénierie système où beaucoup d'incertitudes demeurent. De plus, les processus de RàPC standards se basent sur l'hypothèse que des mesures de similarités entre valeurs de descripteurs sont connues ou aisément calculables [Bergmann, 2002]. Dans la pratique, ceci peut s'avérer difficile à obtenir et très consommateur de temps. Enfin, l'utilisateur peut également souhaiter intégrer ses préférences dans la recherche de cas compatibles à son propre problème. Notre problématique s'attaque donc aux questions suivantes :

- Comment identifier au plus tôt dans le processus d'ingénierie système des expériences similaires si des mesures de similarités ne sont pas disponibles ni calculables, si le problème n'est pas clairement défini ou si beaucoup d'incertitudes demeurent ?
- Comment prendre en compte les préférences de l'utilisateur ?
- Comment utiliser la connaissance existante afin de définir problèmes et solutions avec une sémantique claire et non ambiguë ?

Prises de manière indépendante, ces questions ont trouvé des éléments de réponse dans la littérature (voir section 4.3). Cependant, notre principale contribution est de mener l'approche de RàPC en les traitant simultanément. L'exploitation des expériences est réalisée en s'aidant des connaissances afin de guider le processus [Kamsu-Foguem et al., 2008] (A.4), [Romero et al., 2014] (A.1). Les problèmes ou les requêtes sont exprimés en se basant sur des ontologies de concepts. La phase de recherche du RàPC est réalisée en exploitant ces ontologies afin d'identifier des cas compatibles. De manière systématique, les solutions construites par réutilisation d'acquis, validées et éventuellement mises en œuvre, deviennent des expériences qui sont à leur tour capitalisées à des fins de future réutilisation. De cette manière, le cycle de retour d'expérience est complet. Cette problématique de réutilisation d'acquis est illustrée sur la figure 1.8.

Ce volet est détaillé dans le chapitre 4, section 4.3. Il a été abordé dans nos travaux sur la réutilisation d'expériences et de connaissances en résolution de problèmes [Kamsu-Foguem et al., 2008] (A.4) en utilisant le formalisme des graphes conceptuels [Sowa, 1976, Chein and Mugnier, 1992]. Il

a ensuite été abordé dans les travaux de thèse de Joël Abeille [Abeille, 2011] (PhD.2) et les masters recherche de Céline Boitte [Boitte, 2009] (M2R.3) et Juan Romero [Romero, 2010] (M2R.4), fédérés par le projet ANR ATLAS pour lequel l'activité traitée était celle de conception de systèmes.

Cas 3 : les connaissances sont contextuelles. Cette catégorie de connaissances, bien qu'explicites dans notre cas, sont paramétrables. Leur expression ou leur interprétation dépend du contexte dans lequel elles sont exploitées [Brézillon, 1999], [Brézillon, 2007]). Dans nos travaux, l'exploitation conjointe d'expériences permet de les paramétrer lorsque le contexte dans lequel on va les utiliser est connu. Par exemple, une connaissance contextuelle peut être exprimée (ici, sous forme textuelle) par « *la vitesse de rotation de perçage doit être entre 500 et 1000 tours/mn* ». Selon le contexte (matériaux, diamètre de perçage, etc.), cette connaissance sera paramétrée en consultant la base d'expériences et en extrayant une vitesse de rotation correspondant à ce contexte. Les expériences viennent ainsi en aide à l'exploitation des connaissances. Les connaissances sont formalisées à l'aide de modèles en utilisant le principe des Problèmes de Satisfaction de Contraintes (PSC) [Montanari, 1974], [Gelle et al., 2000] dont certaines contraintes sont paramétrables selon le contexte [Vareilles et al., 2012a] (A.2). Il s'agit donc pour nous de développer un outil d'aide à la décision permettant de paramétrer ces « contraintes contextuelles » en analysant la base d'expériences. L'identification d'expériences qui se sont déroulées dans un contexte similaire et la mise en œuvre de techniques d'apprentissage permettent d'exploiter ces expériences et de préciser les paramètres de ces contraintes selon le contexte. Ainsi, des connaissances à base de modèles, formalisées a priori de manière globale, sont paramétrées (autrement dit précisées) selon le contexte dans lequel on les utilise à partir d'expériences déjà réalisées. Ce troisième point de vue sur la manière de réutiliser des acquis a été abordé dans la thèse d'Aurélien Codet De Boisse [Codet De Boisse, 2013] (PhD.3) co-encadrée avec le laboratoire CGI de l'École des Mines d'Albi, dans le contexte du projet FUI Helimaintenance. Ce travail est détaillé dans le chapitre 4, section 4.4.

Selon le cas 1, des connaissances formalisées au sein d'ontologies viennent en aide à l'ingénierie système en participant à une certaine standardisation facilitant les futures réutilisations. Selon les cas 2 et 3, soit les connaissances viennent en aide à la réutilisation d'expériences, soit ce sont les expériences qui viennent en aide au paramétrage de connaissances dépendant du contexte. Chaque cas correspond à des outils ou approches qui participent à l'aide à la décision pour l'utilisateur dans le processus d'ingénierie système.

1.4.2.5 La résolution distribuée de problèmes

Pour cet outil, notre problématique consiste à proposer des modèles distribués pour la résolution de problèmes. Les standards de résolution de problèmes tels PDCA, 8D, DMAICS, etc. sont très efficaces pour mettre en œuvre l'amélioration continue de manière centralisée. La détection des problèmes et leur caractérisation contextualisée, leur analyse, la construction des solutions et leur mise en œuvre sont réalisées au sein de l'entreprise par ses propres équipes, voire même au sein d'un même service ou atelier. La problématique traitée par Juan Romero, dans le cadre de sa thèse CIFRE (PhD.4) avec l'entreprise AXSENS basée à Toulouse et spécialisée dans le conseil sur les chaînes logistiques, est de traiter cette résolution non plus de manière centralisée mais distribuée en faisant collaborer différents partenaires, acteurs et experts. Les modèles proposés ont été définis dans le cadre des chaînes logistiques. Cependant, ce n'est pas le seul domaine d'application car au sein d'une même entreprise, la résolution d'un problème peut être décentralisée avec des équipes, des services, des points de vue différents. Notre approche doit donc pouvoir être mise en œuvre pour une résolution inter-ateliers par exemple. La mise en œuvre de la démarche doit permettre de constituer des équipes efficaces capa-

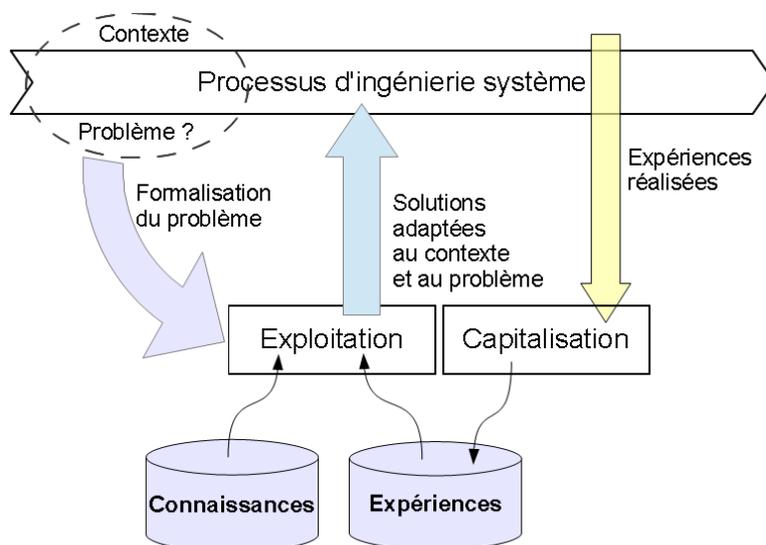


FIGURE 1.8 – Principe de la réutilisation d’acquis

bles de détecter les causes racines et d’y remédier rapidement. L’information permettant de résoudre le problème n’est pas centralisée mais fragmentée et distribuée parmi les différents partenaires. Il est alors nécessaire de mettre en œuvre un processus de résolution distribué supporté par des outils permettant :

- de constituer des équipes de résolution pluridisciplinaires éventuellement issues d’entreprises distinctes de la chaîne logistique,
- d’identifier les processus impactés par les problèmes ou leurs causes,
- d’identifier et consulter les informations distribuées sur l’ensemble de la chaîne logistique afin de mener des analyses,
- d’analyser les causes de problèmes chez les partenaires de la chaîne en favorisant la collaboration et en identifiant les compétences clés,
- de mettre en œuvre des solutions construites collectivement sur l’ensemble de la chaîne de causes et d’effets menant au problème,
- de mesurer collectivement l’avancée des actions correctives et/ou préventives à tous les niveaux de la chaîne logistique,
- d’exploiter les connaissances capitalisées.

Une panoplie d’outils dédiés à la résolution distribuée a été étudiée dans la thèse de Juan Romero (PhD.4). Ces outils sont détaillés dans le chapitre 5, page 111.

1.4.3 Le niveau Expériences/Connaissances

Le dernier niveau du modèle global décrivant la problématique abordée dans mes activités (illustrée figure 1.2) est le niveau *Expériences/Connaissances*. La construction, la gestion, le maintien et l’exploitation des connaissances sont généralement dédiés à la fonction *Knowledge Management* dans les entreprises [Taylor and Zorn, 2004]. La gestion des connaissances vise à améliorer l’organisation de l’entreprise par la mise en œuvre de processus et de pratiques permettant d’identifier et capturer de la connaissance, des savoirs-faire et des expertises, de façon à rendre cette connaissance réutilisable [Lyles and Easterby-Smith, 2003, Easterby-Smith and Lyles, 2011]. Il s’agit alors d’être en

mesure de la capitaliser et de l'exploiter. La capitalisation permet de réutiliser de la connaissance d'un domaine particulier, préalablement modélisée et enregistrée, de manière à réaliser de nouvelles activités [Dalkir, 2011]. L'exploitation permet la diffusion de connaissances pour aider la réalisation des activités courantes et à former les futurs utilisateurs. Des approches comme CommonKADS [Schreiber et al., 1994] sont généralement considérées comme des méthodologies standards de gestion des connaissances. Dans ces approches, le processus de formalisation consiste à capturer la connaissance que les acteurs de l'entreprise mettent en œuvre pour réaliser des tâches. La construction d'un système à base de connaissances (*KBS - Knowledge Based Systems*) est vue comme un processus de modélisation. Les principaux défauts que nous avons listés dans [Kamsu-Foguem et al., 2008] (A.4) sont que ces approches :

- sont basées sur des modèles de haut niveau difficiles à instancier,
- imposent une charge de travail importante,
- requièrent un ingénieur expert en gestion des connaissances,
- entraînent des connaissances peu contextualisées,
- nécessitent de très régulièrement mettre en œuvre des procédures de maintenance et de maintien à jour des connaissances.

En revanche, leur bon niveau de formalisation ainsi que les modèles non ambigus qu'ils mettent en œuvre sont des points positifs.

Une autre approche, développée depuis plusieurs années au LGP, est celle par retour d'expérience (ReX) [Bergmann, 2002] qui permet de gérer les connaissances avec pour objectif de rendre (ré-)utilisables des connaissances expérimentales ou des leçons apprises afin d'améliorer le fonctionnement de l'entreprise. Le but est d'éviter de réitérer les erreurs du passé ou de bénéficier de l'expérience, des savoirs faire acquis lors de la réalisation de tâches. Différents travaux existent dans la littérature [Kolb, 1984, Faure and Bisson, 1999, Rakoto et al., 2002, Rakoto, 2004, Clermont et al., 2007], [Jabrouni et al., 2011]. Les approches sont de type *bottom-up* où la connaissance est construite graduellement à partir d'expériences ou cas. Si l'on considère la hiérarchie standard *Données, Informations, Connaissances*, les expériences viennent se placer entre *Informations* et *Connaissances* [Béler, 2008], [Kamsu-Foguem et al., 2008] (A.4) où les connaissances sont inférées à partir des expériences passées. Dans l'approche de retour d'expérience développée au LGP, nous considérons que la transformation graduelle suit trois étapes issues d'un processus de résolution de problèmes : la formalisation d'un événement contextualisé (niveau Information), la formalisation des analyses mises en œuvre et des solutions obtenues (niveau Expérience) puis leur transformation en leçons apprises, en procédures, en règles, etc. (niveau Connaissance) [Béler, 2008], [Kamsu-Foguem et al., 2008] (A.4), [Jabrouni et al., 2011].

1.4.3.1 La formalisation des expériences dans nos travaux

Dans notre approche, les expériences correspondent à des cas traités lors de la réalisation d'activités du processus d'ingénierie système, de planification de projet et de résolution de problèmes. Le niveau *Outils* exploite ces expériences mais également, participe à leur élaboration. Ainsi, l'activité de conception de systèmes donnera lieu à des expériences correspondant aux démarches de développement, de l'expression des besoins jusqu'à la fourniture de systèmes conçus, voire réalisés. L'activité de résolution de problèmes génère des expériences correspondant à la formalisation de problèmes, d'analyses et de solutions. L'outil d'optimisation, quant à lui, génère des expériences correspondant aux solutions obtenues pour le *problème de conception de systèmes / planification de projet*.

Notre problématique concerne la formalisation des expériences de manière à ce qu'elles puissent

être exploitées ensuite efficacement par les décideurs. Nous devons atteindre un bon niveau de formalisation ainsi que des modèles non-ambigus afin de garantir leur future exploitation. Ainsi, dans nos travaux, les expériences sont formalisées soit en utilisant les graphes conceptuels [Sowa, 1976], soit en définissant nos propres modèles à base de classes, d'objets et de descripteurs (attributs). Ces choix sont principalement guidés par les outils de réutilisation développés au niveau *Outils* ainsi que les types de connaissances exploitées. Ces types de connaissances sont décrits dans la section suivante.

1.4.3.2 La formalisation des connaissances dans nos travaux

Notre problématique globale est de représenter les connaissances en construisant des modèles formels, non-ambigus et favorisant l'interopérabilité sémantique [Kamsu-Foguem et al., 2008] (A.4). F. Vernadat dans [Vernadat, 2010] définit de manière générale l'interopérabilité comme la mesure de la capacité de plusieurs entités à interagir au sein d'une entreprise distribuée ou d'un réseau d'entreprises. Il peut s'agir de logiciels, de processus, de systèmes, d'unités décisionnelles, etc. Dans ce contexte, les ontologies apportent des solutions significatives. Une ontologie est *la spécification d'une connaissance explicite à propos d'une conceptualisation* [Gruber, 1993, van Heijst et al., 1997]. Elle permet de préciser les concepts (ou les termes) utilisables pour décrire les connaissances, les relations possibles entre les concepts et, éventuellement, les contraintes d'utilisation [Valente and Breuker, 1996], [Dieng and Hug, 1998]. Un concept est une interprétation organisée et structurée d'une partie du monde réel utilisée pour penser et communiquer sur cette partie du monde [Darlington and Culley, 2008]. Une ontologie permet ainsi à une communauté d'experts d'un domaine particulier d'exprimer des informations sémantiques consensuelles [Studer et al., 1998]. Les ontologies sont généralement organisées en classifications d'éléments dont le principe le plus commun est la généralisation/spécialisation [Sowa, 1984]. Il s'agit dans ce cas de classer les éléments dans une arborescence ou un graphe. Plus un élément est proche de la racine, plus il est général, plus il s'en éloigne, plus il est spécialisé. De nombreuses applications des ontologies existent en conception de systèmes (voir par exemple [Uschold and Gruninger, 1996], [Kim et al., 2006], [Chang et al., 2008], [Borsato, 2014]).

Notre problématique globale de formalisation des connaissances se spécialise ensuite selon quatre axes correspondants aux *Outils* :

- pour les outils de synchronisation entre processus d'ingénierie et processus de planification de projet, il s'agit de développer des modèles de **connaissances méthodologiques**. Ces connaissances sont des modèles génériques et intégrés i) d'informations et ii) de processus d'obtention de ces informations. Ces modèles sont capitalisés en tant que connaissances méthodologiques et instanciés à chaque nouvelle mise en œuvre d'un projet d'ingénierie. Dans nos propositions, le modèle générique d'informations est représenté à l'aide du formalisme UML (*Unified Modelling Language*), celui de processus est représenté à l'aide du formalisme BPMN (*Business Process Modelling Notation*). Ces modèles sont détaillés dans le chapitre 3, section 3.2, page 72,
- pour les outils de réutilisation d'acquis, il s'agit de développer des modèles de **connaissances métier**, c'est-à-dire des connaissances d'un domaine particulier. Dans nos travaux, le choix s'est porté sur les ontologies. Les éléments de connaissance métier qui y sont fédérés sont consultables et exploitables directement par les acteurs de l'ingénierie système. Grâce à la connaissance qu'ils contiennent, d'une part ces éléments doivent permettre de guider directement la réalisation des activités et, d'autre part, de formaliser les expériences. Pour la réutilisation d'acquis en résolution de problèmes, nous avons choisi le formalisme des Graphes Conceptuels [Sowa, 1976]. Les ontologies y sont représentées par des treillis de concepts et de relations

[Sowa, 1976, Mugnier and Chein, 1998] et l'approche dispose en outre de mécanismes de raisonnement comme l'opérateur de projection [Chein and Mugnier, 1992]. Pour la réutilisation d'acquis en conception de systèmes, nous avons défini des taxonomies de concepts qui encapsulent des caractéristiques intrinsèques à l'aide de Problèmes de Satisfaction de Contraintes (voir par exemple [Yang et al., 2008] pour de telles approches). Ces modèles sont détaillés dans le chapitre 4, section 4.3, page 94,

- pour les outils d'exploitation de connaissances aidés par les expériences, il s'agit de développer des modèles de **connaissances contextuelles** (ce sont avant tout des connaissances métier) à l'aide de Problèmes de Satisfaction de Contraintes où certaines contraintes sont paramétrables selon le contexte d'application. Ces modèles sont détaillés dans le chapitre 4, section 4.4, page 105,
- pour les outils d'optimisation, il s'agit de formaliser des **connaissances décisionnelles** à propos de l'influence des décisions sur la satisfaction des objectifs. Ces influences sont formalisées à l'aide d'un réseau bayésien [Pearl, 1988]. Ces modèles sont détaillés dans le chapitre 3, section 3.3, page 79.

Une catégorie particulière de connaissances concerne les agents utilisés pour la reconfiguration de systèmes automatisés. Chaque agent dispose de sa propre connaissance sur une partie du système qu'il représente et qu'il pilote. Cette connaissance concerne notamment les possibilités de reconfiguration de l'agent au sein du système. Celle-ci est formalisée grâce à un Graphe d'Accessibilité Opérationnelle [Berruet et al., 2000] décrivant toutes les possibilités d'enchaînement des activités (ou tous les états possibles) pour le système automatisé représenté par l'agent. Ces modèles sont détaillés dans le chapitre 2.

Pour nos travaux, les catégories de connaissances et les formalismes utilisés sont synthétisés dans le tableau 1.1.

Catégories de connaissances	Rôle	Formalisme
Agents	Capitaliser des connaissances sur les capacités de reconfiguration d'un système automatisé	Graphe d'Accessibilité Opérationnelle (GAO)
Connaissances Méthodologiques	Capitaliser sur la manière de réaliser des activités (informations et processus)	Modèles UML et BPMN
Connaissances Métier	Capitaliser sur les artefacts à concevoir	Ontologies et Problèmes de Satisfaction de Contraintes
Connaissances Contextuelles	Capitaliser sur les artefacts à concevoir en tenant compte du contexte	Problèmes de Satisfaction de Contraintes paramétrables
Connaissances Décisionnelles	Capitaliser sur les influences des décisions de conception et de planification sur la satisfaction des objectifs	Réseaux Bayésiens

TABLE 1.1 – Synthèse des catégories de connaissances

1.5 Conclusion et plan du document

Ce premier chapitre a permis de décrire la problématique abordée dans nos travaux à un niveau global, appuyée par un premier niveau d'étude bibliographique. Nous avons ainsi montré que nos contributions pouvaient se décliner selon un modèle à trois niveaux :

- le niveau **Processus** permet d'étudier les opportunités d'interaction entre un processus général d'ingénierie système et un processus de pilotage d'un système automatisé, un processus de planification d'un projet d'ingénierie système et un processus de résolution de problèmes. Outre le contexte global des interactions, nous avons décrit les besoins de synchronisations et d'échanges nécessaires.
- le niveau **Outils** permet de définir les besoins en outils d'aide à la décision impliqués par les couplages définis au niveau Processus. Ces outils concernent la reconfiguration de systèmes transitiques, la synchronisation entre processus de planification de projet et d'ingénierie système, l'optimisation guidée par les connaissances, la réutilisation d'acquis et la résolution distribuée de problèmes,
- le niveau **Expériences/Connaissances** permet de formaliser les expériences et connaissances nécessaires au fonctionnement du niveau *Outils*. Nous avons exprimé dans cette dernière section les besoins de formalisation des expériences et des connaissances nécessaires.

De plus, nous avons montré qu'un processus général de retour d'expérience permettait d'avoir une vision verticale sur ces niveaux : suite à leurs interactions, la mise en œuvre d'un outil d'aide à la décision pour traiter un problème entraîne la caractérisation d'expériences qui sont capitalisées à des fins d'exploitation ultérieure.

Cette première vision globale de nos travaux doit maintenant être détaillée. Les techniques et les modèles mis en œuvre ainsi que les résultats obtenus, les liens avec les projets et les publications relatives doivent être précisés. La figure 1.9 illustre les thèmes qui sont abordés dans les chapitres suivants. Ces thèmes sont directement orientés par les outils développés (niveau *Outils*).

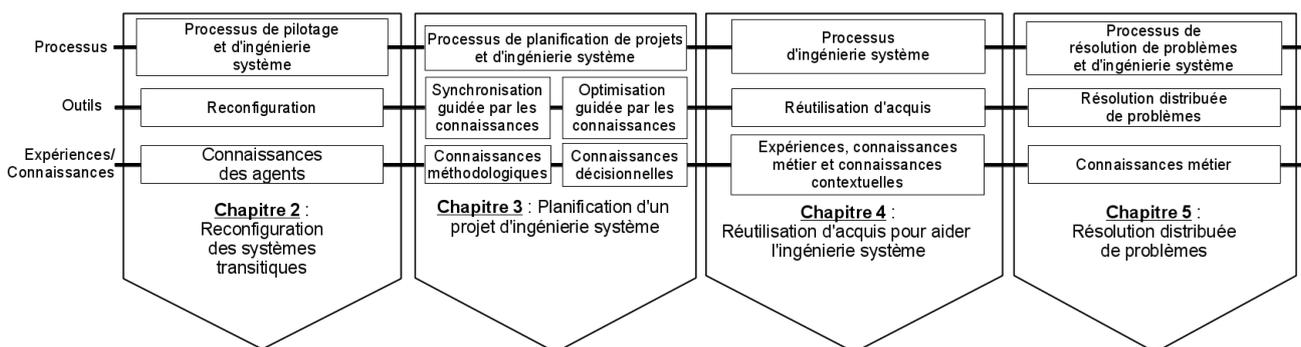


FIGURE 1.9 – Thèmes abordés dans les chapitres

Dans le **chapitre 2**, l'interaction du processus de pilotage avec le processus d'ingénierie système est détaillée. L'accent est mis sur l'outil support permettant la reconfiguration à l'aide des systèmes multiagents et à l'algorithme des fourmis. Les connaissances sont celles des agents. Elles concernent les possibilités de reconfiguration de la part du système automatisé représentée et pilotée par l'agent. Le système multiagent que nous avons développé pour piloter/modéliser un système transitique est

détaillé. Le principe de reconfiguration par algorithme des fourmis est expliqué ainsi que les résultats obtenus lors de tests par simulation sur une plate-forme multiagent ad-hoc. Ce travail a notamment été abordé dans le master recherche de Mohcen Benlagha.

Dans le **chapitre 3**, l'interaction de la planification d'un projet d'ingénierie système avec le processus d'ingénierie système lui-même est détaillée. Deux outils supports sont abordés : l'outil de synchronisation et l'outil d'optimisation.

1. L'outil de synchronisation des processus est guidé par des connaissances méthodologiques (méta-modèles de données et de processus). Ce travail, mis en œuvre dans le cadre du projet ANR ATLAS et supporté par la thèse de Joël Abeille (PhD.2), est exposé. Suite à la caractérisation des couplages requis et une analyse bibliographique affinée, les modèles de données et de processus sont décrits. Ces modèles ainsi que l'analyse des états possibles pour les entités ont mené au développement d'un logiciel de type démonstrateur (logiciel ATLAS). Ces travaux ainsi que les résultats obtenus sont synthétisés dans la **section 3.2**.
2. L'outil d'optimisation est guidé par la connaissance décisionnelle (réseau bayésien obtenu par apprentissage sur des expériences). Le problème de choix de scénarios de projets intégrant à la fois la dimension projet et la dimension conception est décrit au regard de la littérature. L'outil d'optimisation multicritère à base d'algorithme évolutionnaire et basé sur un guidage par des connaissances décisionnelles est décrit. L'algorithme modifié ainsi que le modèle de connaissances décisionnelles sont décrits. Les résultats majeurs obtenus suite aux tests réalisés sont exposés. Ces travaux, développés dans le cadre de la thèse de Paul Pitiot (PhD.1) sont présentés dans la **section 3.3**.

Dans le **chapitre 4**, les méthodes développées pour supporter le processus d'ingénierie système par l'exploitation d'acquis (connaissances et expériences) sont détaillées. Ce chapitre est décomposé en trois sections : l'exploitation de connaissances métier, l'exploitation d'expériences guidées par les connaissances métier et l'exploitation de connaissances guidées par les expériences (connaissances contextuelles).

1. L'outil d'aide à la décision basé sur l'exploitation de connaissances métier est décrit. La formalisation dans une ontologie de ces connaissances et leur exploitation en conception est décrite dans la **section 4.2**.
2. L'outil d'aide à la décision basé sur l'exploitation d'expériences guidée par les connaissances métier est présenté. La problématique de raisonnement à partir de cas est exposée et l'approche permettant d'identifier des expériences compatibles en tenant compte des préférences du décideur et du manque de mesures de similarités est abordé. Les tests et résultats majeurs obtenus sont commentés. Ce volet est exposé dans la **section 4.3**. Le travail exposé dans ces deux sections (section 4.2 et section 4.3) a été abordé dans le cadre du projet ANR ATLAS dans la thèse de Joël Abeille (PhD.2) et les masters recherche de Celine Boitte (M2R.3) et Juan Romero (M2R.4).
3. L'outil d'aide à la décision basé sur l'exploitation d'expériences pour aider à l'exploitation de connaissances contextuelles est décrit. La formalisation de connaissances contextuelles par problème de satisfaction de contraintes est décrit ainsi que leur paramétrage par apprentissage sur les expériences à l'aide d'un outil de data-mining. Ce travail a été réalisé dans le cadre du projet FUI Hélimaintenance par Aurélien Codet De Boisse (PhD.3). Il est synthétisé dans la **section 4.4**.

Dans le **chapitre 5**, l'interaction du processus de résolution de problèmes avec le processus d'ingénierie système est détaillée sous l'angle de la résolution distribuée d'un problème dans le cadre d'une chaîne

logistique. Les modèles distribués développés ainsi que les mécanismes exploitant des connaissances métier sont détaillés. Les modèles de processus ainsi que les mécanismes de support permettant de favoriser la collaboration d'équipes distribuées sur la chaîne logistique sont exposés. Ce travail a été réalisé dans le cadre d'un contrat de thèse CIFRE avec l'entreprise AXSENS à Toulouse par Juan Romero (PhD.4).

Pour terminer ce manuscrit, le chapitre 6 permet de conclure, de proposer des perspectives de continuation et de développer mon projet de recherche.

Chapitre 2

Reconfiguration des systèmes transitiques

2.1 Introduction

Nous abordons dans ce chapitre les travaux les plus anciens réalisés au laboratoire LESTER entre 2001 et 2004. Ces travaux ont été développés à partir de l'activité courante de l'équipe concernant la conception conjointe de systèmes automatisés de type systèmes transitiques et de leur commande. Durant cette période, il n'y a pas eu de thèse encadrée, mais Mohcen Benlagha a eu l'occasion de travailler sous ma responsabilité dans le cadre de son DEA et de contribuer à ces travaux. Ces travaux ont constitué une passerelle essentielle entre mon activité de recherche développée lors de ma thèse et concernant l'ordonnancement conjoint production/maintenance par systèmes multiagents et l'activité de planification de projets d'ingénierie système développée ultérieurement au Laboratoire Génie de Production. Dans ces travaux, nous nous sommes donc intéressés à la reconfiguration des systèmes transitiques par une approche « agent ». La problématique abordée est décrite dans la section 2.2 puis les développements sont détaillés dans la section 2.3 et enfin un bilan est donné dans la section 2.4.

2.2 Problématique de la reconfiguration des systèmes transitiques

Nous avons donné dans le chapitre 1 une première définition de la problématique abordée. Nous complétons celle-ci de manière plus détaillée. La maîtrise de la conception des systèmes de contrôle/commande implique d'obtenir, dès les phases de spécification et de conception préliminaires, une bonne adéquation entre la solution fonctionnelle et l'architecture matérielle sur laquelle elle sera implantée [Coudert et al., 2002] (B.26), [Coudert et al., 2003] (B.21), [Berruet et al., 2004] (B.17). Ceci permet un gain en temps de conception, une réduction des coûts, et garantit de meilleures capacités d'évolution et une plus grande pérennité de la solution obtenue. Parallèlement, la validité doit être prouvée au plus tôt dans le cycle de conception par l'utilisation de techniques d'analyse et de validation. Dans l'évaluation d'un ensemble de solutions, la simulation prend toute son importance. L'utilisation que nous proposons est l'anticipation du comportement en situation de dysfonctionnement afin d'orienter la prise de décision lors de la reconfiguration (la reconfiguration faisant partie du pilotage).

Comme nous l'avons indiqué dans le chapitre 1, la reconfiguration consiste en une réorganisation à la fois de la structure matérielle de l'équipement et de sa commande [Berruet et al., 2000, Toguyéni et al., 2003]. Cela signifie que la reconfiguration doit être conçue conjointement avec le système lui-même. En phase d'exploitation, l'activité de support doit permettre de mettre en œuvre la reconfiguration, c'est-à-dire de modifier physiquement les équipements matériels mais également d'adapter leur commande. Toutes ces modifications peuvent être anticipées en phase de conception en envisageant et en simulant des dysfonctionnements et en concevant comment le système est en mesure d'être reconfiguré. L'application de nos travaux se situe dans le domaine des systèmes transitiques. Ce sont des systèmes extrêmement modulaires et flexibles qui doivent permettre de distribuer des produits dans tout le système de production afin d'y effectuer des opérations. La reconfiguration peut intervenir lors de l'apparition de défaillances sur certaines parties du système de production. Elle peut amener à modifier physiquement l'installation de ces éléments de transport et à modifier les programmes de commande. Ainsi, des modèles modulaires, flexibles et distribués peuvent être utiles non seulement en phase de conception (dans une approche *bottom-up*, des éléments archivés sont assemblés progressivement pour composer un système complet [Coudert et al., 2002] (B.26)) mais également pour piloter le système en phase d'exploitation (contrôle/commande, supervision, reconfiguration, etc.). Dans ce contexte où des éléments de système distribués sont assemblés et doivent fonctionner harmonieusement,

les Systèmes MultiAgents (SMA) constituent une solution. En effet, ce type de système est composé d'entités autonomes, réelles ou abstraites, qui sont capables d'agir sur elles-même et sur leur environnement et qui peuvent communiquer avec les autres agents. Leur comportement est la conséquence de leurs observations, de leurs connaissances et des interactions avec les autres agents [Ferber, 1995]. Un système transitique est alors vu comme un ensemble d'unités de transport distribuées, autonomes, intelligentes, tolérantes aux fautes et réutilisables [Coudert et al., 2003] (B.21) chargées de transférer des produits vers leurs lieux de transformation. En cas de problème, ces unités peuvent, par des mécanismes de coopération, trouver des solutions et permettre la reconfiguration du système. En phase d'exploitation nominale, les agents doivent coopérer afin de faire transiter les produits aux bonnes destinations. En phase de reconfiguration, les agents doivent coopérer afin de trouver une nouvelle configuration et permettre au système de continuer sa mission. Nous voyons également que les produits peuvent être modélisés par des agents. Un produit devient « intelligent » et peut ainsi coopérer avec son système de production afin que les opérations nécessaires soient réalisées. Notre travail s'est principalement concentré sur la phase de conception où un SMA, modélisant le système transitique, les machines et les produits, permet la simulation du pilotage et de la reconfiguration et la validation des scénarios qui pourront être mis en œuvre en phase d'exploitation.

Afin d'envisager la reconfiguration d'un système transitique, il est nécessaire de modéliser toutes les opérations que le système peut effectuer avec les contraintes de précédence entre opérations. Ceci est réalisé dans nos travaux en exploitant un Graphe d'Accessibilité Opérationnelle (GAO) initialement proposé par P. Berruet dans [Berruet et al., 2000]. Dans un GAO, les nœuds correspondent à des opérations réalisables (transfert, éjection, attente, stockage, etc.) et les arcs représentent les contraintes de précédences entre opérations. Un chemin dans le graphe correspond à une solution que le pilotage doit ensuite mettre en œuvre, c'est-à-dire à une succession d'opérations que les produits doivent subir. En cas de défaillance d'un élément du système, une partie du graphe correspondant aux opérations qu'il devait être en mesure de réaliser est désactivée. Nous considérons alors que la première phase de la reconfiguration consiste à trouver un nouveau chemin dans le GAO afin que les produits continuent leurs traitements. Dans un contexte distribué, il est nécessaire de développer un SMA capable de réaliser une telle reconfiguration.

Afin de chercher un chemin dans le GAO, nous avons choisi une approche flexible basée sur un algorithme de fourmis (*Ant Colony Optimization* - ACO [Dorigo, 1992, Dorigo and Stützle, 2004]). Le principe est qu'une colonie de fourmis artificielles cherchent un chemin aléatoirement dans un graphe. A chaque choix possible, une fourmi choisit un chemin selon une probabilité dépendant de l'attractivité du prochain nœud auquel le chemin mène (information locale) et de l'intérêt du chemin vis-à-vis des critères choisis (information globale). Chaque fourmi ayant atteint son but dépose une quantité de phéromones sur le chemin qu'elle a emprunté inversement proportionnelle à la valeur du critère qu'elle a obtenu. Plus un chemin est intéressant vis-à-vis d'un critère, plus la trace de phéromones est importante et donc, plus le chemin est attractif pour les autres fourmis. Notre système étant distribué, il est nécessaire d'adapter l'algorithme ACO.

Notre **problématique détaillée** se résume ainsi : il s'agit de développer un modèle à base de SMA capable de modéliser un système transitique dès la phase de conception et d'en assurer le pilotage (plus particulièrement la reconfiguration) en phase d'exploitation. Des agents modélisant les produits doivent être intégrés. La reconfiguration doit être réalisée par le SMA grâce à la communication et la coopération en exploitant un algorithme de fourmis.

2.3 Développements

Nous développons dans cette section les propositions faites pour la reconfiguration des systèmes transitiques par SMA et algorithme ACO. Dans la section 2.3.1 nous présentons le modèle GAO et l'impact des aléas sur celui-ci. Dans la section 2.3.2, nous abordons l'algorithme ACO pour la reconfiguration. Le SMA développé est décrit dans la section 2.3.3 et les résultats obtenus sur des expérimentations sont donnés dans la section 2.3.4.

2.3.1 Le Graphe d'Accessibilité Opérationnelle et la reconfiguration

Notre modèle de base est un GAO représentant toutes les opérations réalisables par le système transitique avec leurs contraintes de précédence. Dans un GAO, une opération est une fonction réalisée par une ressource. Une fonction décrit un travail (*job*) sans préciser les ressources requises. Pour un système transitique, deux opérations existent : les opérations de transfert et les opérations d'arrêt (ou stockage). Une opération de transfert fait se déplacer un produit alors qu'une opération d'arrêt permet de regrouper un ou plusieurs produits dans une zone déterminée. Les opérations de transformation sont désignées comme des opérations « d'arrêt pour transformation », ces transformations devant être réalisées par des ressources externes au système transitique (machine outil, poste de montage, etc.). Un GAO est un modèle statique qui permet de représenter toutes les possibilités d'action du système transitique et, notamment, toutes les redondances, les alternatives possibles. Les systèmes transitiques sont souvent des systèmes en boucle où les produits peuvent effectuer plusieurs rotations avant d'être dirigés vers les postes de transformation requis. Ceci permet donc d'envisager la reconfiguration, en cas de perte de certaines fonctions dans le système, en recherchant des alternatives et en allant vers la meilleure possible au regard de certains critères. Le GAO que nous avons défini est un modèle dynamique qui va évoluer au cours du temps afin de représenter les évolutions, les aléas, les défaillances, etc.

Nous formalisons le GAO dynamique de la manière suivante : $GAO = \{N, A\}$ où N est un ensemble de nœuds et A , un ensemble d'arcs reliant des nœuds. Chaque nœud n ($n \in N$) est associé à un triplet (OP_n, d_n, W_n) où OP_n est l'opération correspondant au nœud, d_n est la durée nominale de l'opération et W_n est le temps d'attente. Chaque opération OP_n est décrite par le couple $(f(n), R(n))$ où $f(n)$ est la fonction et $R(n)$ la ressource. Un exemple de GAO simple est donné sur la figure 2.1. Nous représentons un convoyeur simple avec un point d'arrêt (par un système de levée de butée) permettant à un opérateur d'effectuer soit un contrôle, soit un montage selon le produit. Un produit peut également ne pas s'arrêter à ce poste. Les durées d'attentes sont nulles dans cet exemple. Le GAO comporte donc 7 opérations. OP_1 : Entrée (durée nulle), OP_2 : Transfert vers le poste (durée 5), OP_3 : Arrêt pour montage (durée 10) ou OP_4 : Arrêt pour contrôle (durée 15) ou OP_5 : pas d'arrêt (durée nulle), OP_6 : Transfert vers la sortie (durée 5) et finalement OP_7 : Arrêt sur stock de sortie (durée nulle).

L'occurrence de problèmes dans le système se traduit par la modification du GAO dynamique. Une défaillance d'une machine va se traduire par l'inhibition des nœuds et des arcs correspondants, un fonctionnement en mode dégradé va allonger les durées opératoires et les durées d'attente, etc. En pareil cas, la reconfiguration doit être mise en œuvre afin de trouver un nouveau chemin dans le GAO au regard de certains critères (plus court chemin par rapport au temps de cycle par exemple). L'algorithme *Ant Colony Optimization* a été utilisé pour cela. Son fonctionnement est décrit dans la section suivante.

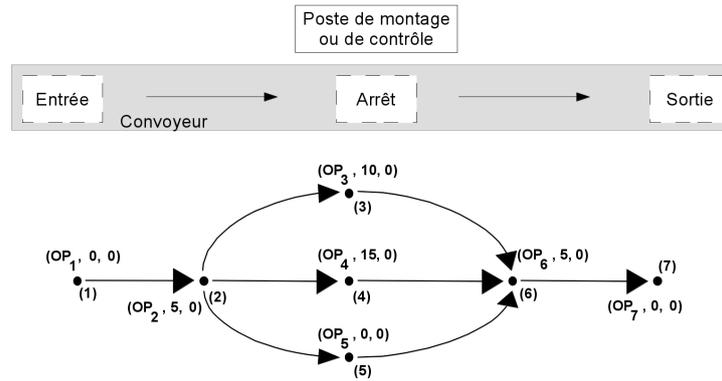


FIGURE 2.1 – Exemple de Graphe d’Accessibilité Opérationnelle simple

2.3.2 La reconfiguration par l’algorithme ACO

Dans la reconfiguration, un produit qui doit passer sur des postes va rechercher, à l’aide d’une colonie de fourmis artificielles un nouveau chemin dans le GAO dégradé par l’apparition d’un aléa. Le produit P doit subir une suite séquentielle d’opérations *d’arrêt pour transformation* (notée f_i) regroupées dans l’ensemble $F^P = \{f_i\}$. Chaque fourmi de la colonie est un représentant virtuel du produit P et cherche un chemin dans le graphe en parcourant les arcs. Chaque arc a_{ij} de l’ensemble A comporte une information (notée τ_{ij}) appelée *trace de phéromone* et correspondant à l’attrait global de cet arc par rapport à un critère. Plus la trace de phéromone est importante, plus le chemin sur lequel se situe l’arc est intéressant vis-à-vis du critère choisi. Une fourmi artificielle k « se déplace » sur le graphe en parcourant les arcs et les nœuds. Lorsqu’un choix est possible sur un nœud i , la fourmi choisit le prochain nœud j à rejoindre selon une probabilité dépendant de l’attractivité du nœud j et de la trace de phéromone τ_{ij} selon l’équation 2.1. Seuls les nœuds correspondants à des fonctions de F^P sont autorisés et donc, une fourmi k sur un nœud i est autorisée à rejoindre les nœuds de l’ensemble J_i^k ($J_i^k \subset F^P$). Les paramètres α et β ($\alpha + \beta = 1$) permettent de pondérer l’effet des informations locales et globales.

$$p_{ij}^k = \frac{(\tau_{ij})^\alpha * (\eta_{ij})^\beta}{\sum_{l \in J_i^k} ((\tau_{il})^\alpha * (\eta_{il})^\beta)} \quad (2.1)$$

L’attractivité du nœud j à partir du nœud i est une heuristique définie par l’équation 2.2. Elle dépend de la durée et du temps d’attente correspondant au nœud j , une durée « courte » étant plus attractive.

$$\eta_{ij} = \frac{1}{d_j + W_j} \quad (2.2)$$

Lorsqu’une fourmi k a cheminé sur l’ensemble d’arcs $C^k = \{a_{rs}\}$ qu’elle a mémorisé, qu’elle a rencontré toutes les opérations requises de F^P et a rejoint le point de sortie du système transitive, elle dépose une quantité de phéromone sur tous les arcs du chemin C^k (équation 2.3). Cette quantité dépend de la valeur du critère obtenue. Le critère choisi est le temps de cycle du chemin (T^k) : plus il est court, plus la quantité déposée est forte et donc, plus le chemin devient attractif pour les futures

fourmis.

$$\tau_{rs} = \tau_{rs} + 1/T^k \quad \forall a_{rs} \in C^k \quad (2.3)$$

Afin d'éviter aux fourmis de « s'enfermer » dans des chemins peu performants (minimum locaux), les traces de phéromones s'évaporent au cours du temps (à chaque itération t) selon le taux d'évaporation ρ (équation 2.4).

$$\tau_{ij}(t + 1) = (1 - \rho) * \tau_{ij}(t) \quad (2.4)$$

A chaque fin d'itération, si un meilleur chemin a été trouvé, il remplace l'ancien. Pour une nouvelle itération, les fourmis repartent de zéros, mais en bénéficiant cette fois de l'expérience offerte par les précédentes fourmis ayant déposé leurs traces de phéromones lors des précédentes itérations. A la fin de toutes les itérations, un chemin correspond à une solution de reconfiguration, c'est-à-dire qu'un nouveau chemin existe pour le produit P qui peut poursuivre sa nouvelle route. La commande du système transitique doit alors être adaptée à ce nouveau chemin. Si l'on considère une approche centralisée, il peut s'avérer difficile de modifier la commande. C'est pour cette raison que nous considérons une approche distribuée par systèmes multiagents décrite dans la section suivante.

2.3.3 Le système multiagent

Le GAO que nous avons décrit dans la section précédente est global et centralisé. Il doit modéliser l'ensemble des possibilités du système transitique. Nous avons préféré une approche distribuée où un agent modélise chaque éléments du système transitique. A chacun de ces éléments, correspond un GAO partiel qui va constituer une partie des connaissances de l'agent. L'interaction des agents dans le SMA permet de constituer le GAO complet. Il est bien entendu nécessaire de vérifier, lors de l'activité de conception, les « interfaces » entre agents, c'est-à-dire de contrôler que la « sortie » d'un agent correspond bien à l'entrée d'un autre agent. Trois catégories d'agents coopèrent dans notre système :

- les agents Transitique : ils modélisent des parties de système transitique (convoyeur, ascenseur, trieurs, etc.). Leurs connaissances concernent les possibilités représentées dans un GAO partiel ainsi que la commande qu'ils peuvent mettre en œuvre selon les décisions prises, les communications qu'il ont avec les autres agents et les perceptions qu'ils ont de leur environnement (capteurs). La mise en œuvre de la commande permet d'agir sur l'environnement (actionneurs),
- les agents Produit : un agent Produit modélise un produit particulier avec pour but d'atteindre la sortie du système de production le plus rapidement possible après avoir subit une succession de fonctions (*jobs*) requises (F^P),
- les agents Fourmis : un agent Fourmi est un représentant d'un agent Produit. Son but est de simuler un cheminement dans le système transitique et de trouver, en coopérant avec les agents Transitique, un chemin qui minimise le temps de cycle.

Un exemple de deux agents Transitique correspondants à deux éléments de transitique connectés (un convoyeur amont disposant d'un poste de montage et un convoyeur aval disposant d'un poste de contrôle) sont représentés sur la figure 2.2. La sortie du convoyeur amont correspond à l'entrée du convoyeur aval. Chaque agent dispose de connaissances sur le GAO partiel le concernant ainsi que sur la commande qu'il est chargé de mettre en œuvre. Il dispose également d'un modules de communication avec les autres agents via un medium, d'un module de décision et de modules d'action et de perception permettant d'interagir avec l'environnement.

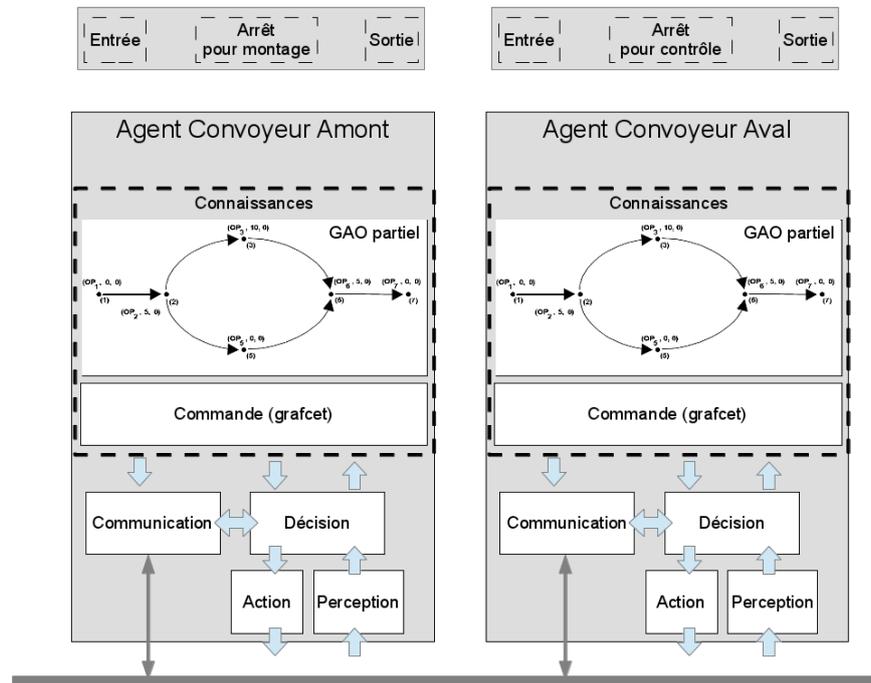


FIGURE 2.2 – Exemple de système multiagent simple

Afin de mettre en œuvre la reconfiguration, les agents Fourmis simulent le déplacement d'un agent Transitique à l'autre en parcourant les GAO partiels. Le fonctionnement reste identique, mais le GAO n'est plus centralisé mais distribué. Un protocole de coopération spécifique a été développé afin de permettre la demande de mise à jour des traces de phéromones par les agents Fourmis ainsi que les déplacements aléatoires guidés.

Lors de la phase de conception, il est possible de vérifier, par simulation du fonctionnement du système multiagent que le système conçu respecte les exigences exprimées. Il est surtout possible de concevoir la reconfiguration en cas d'aléas. La mise en œuvre de l'algorithme ACO par les agents Transitique, Produit et Fourmis en phase de conception par simulation sur une plate-forme multiagent permet de valider un futur comportement en phase d'exploitation. Les agents peuvent ensuite être implémentés avec leur propre contrôleur sur site et la reconfiguration mise en œuvre directement sur le système réel. L'avantage de l'approche agents est qu'elle est très flexible et réactive, les agents s'adaptant en temps réel aux modifications, prévues ou non, de leur environnement.

Afin de tester notre modèle, nous avons réalisé quelques expérimentations sur une plate forme multiagent développée pour l'occasion que nous détaillons dans la section suivante.

2.3.4 Expérimentations et résultats

Nous avons testé notre approche en modélisant, à l'aide d'agents, un convoyeur réel implanté à l'IUP Génie des systèmes Industriels de Lorient (voir figure 2.3). Il s'agit d'un convoyeur à rouleaux permettant de distribuer des produits vers cinq postes de travail (W1 à W5). Un convoyeur central circulaire permet la rotation des produits. Chaque poste possède sa propre dérivation permettant de diriger les produits devant un opérateur (ou une machine). Sur un poste, un seul produit peut être traité

simultanément. Des vérins pneumatiques permettent d'aiguiller les produits vers leurs destinations. Sur la figure 2.3, les fonctions réalisables sur les postes de travail sont représentées (f1 à f5). Certaines fonctions peuvent être réalisées sur différents postes ce qui permet d'envisager la reconfiguration en cas d'aléas.

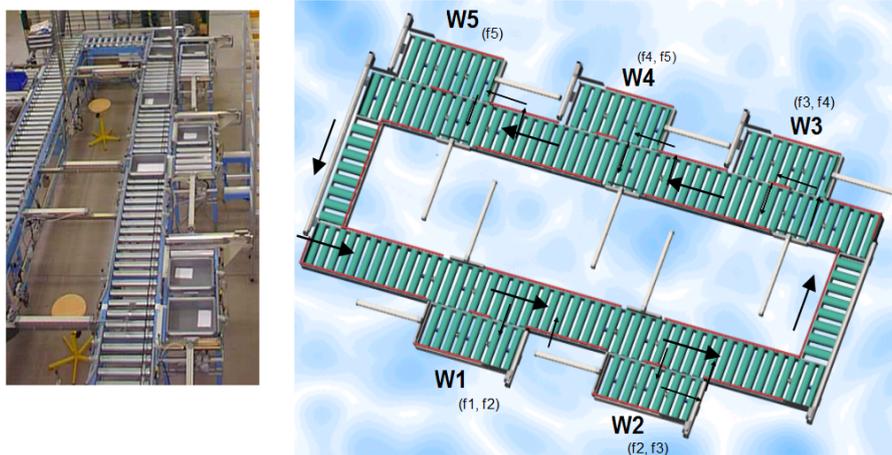


FIGURE 2.3 – Système transitique test : le convoyeur de l'IUP GSI de Lorient

Afin de réaliser un modèle à base d'agents et de le mettre en œuvre, nous avons développé en langage Java la plate-forme multiagent JAMAS (figure 2.4) dédiée à la reconfiguration des systèmes transitiques. Cette plate forme permet d'éditer et de définir le comportement des agents et de simuler leur fonctionnement.

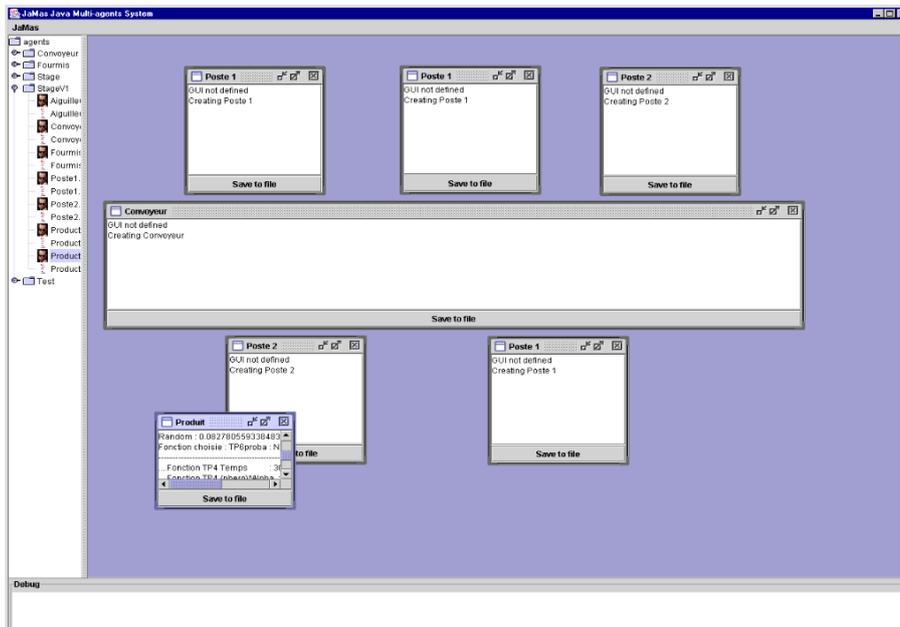


FIGURE 2.4 – Plate-forme multi-agents JAMAS

Nous avons simulé le fonctionnement suivant : un produit P, représenté par son agent Produit,

est en cours de réalisation dans le système. Il doit subir les fonctions suivantes de l'ensemble $F^P = \{f_2, f_3, f_4\}$. Sa route initialement prévue est de rejoindre le poste $W1$ (fonction f_2) puis le poste $W2$ (fonction f_3) et enfin, le poste $W3$ (fonction f_4). A un certain moment, l'agent Produit P, en cours de traitement sur le poste $W1$, reçoit un message de l'agent $W2$ concernant la perte de la fonction f_3 (le GAO partiel de l'agent $W2$ est mis à jour). Il lance alors la reconfiguration à l'aide de l'algorithme ACO. Une colonie de 200 fourmis est lancée afin de trouver un nouveau chemin. La figure 2.5 illustre, pour chaque itération, le meilleur résultat trouvé pour le temps de cycle. Nous voyons que le meilleur temps trouvé est de 71 minutes pour le temps de cycle. Ce temps est également le temps optimal, mais l'algorithme, comme toute méthode heuristique, ne garantit pas nécessairement l'optimalité. Il est obtenu dès la sixième itération, l'algorithme convergeant progressivement vers cette valeur. Le nouveau chemin obtenu est désormais le suivant : Convoyeur \rightarrow Poste $W3$ (fonction f_3 puis f_4) \rightarrow Convoyeur \rightarrow Sortie. L'agent Produit doit envoyer des messages aux agents concernés (agents Convoyeur et $W3$) afin qu'ils reconfigurent leur commande et le transportent vers les nouvelles zones requises.

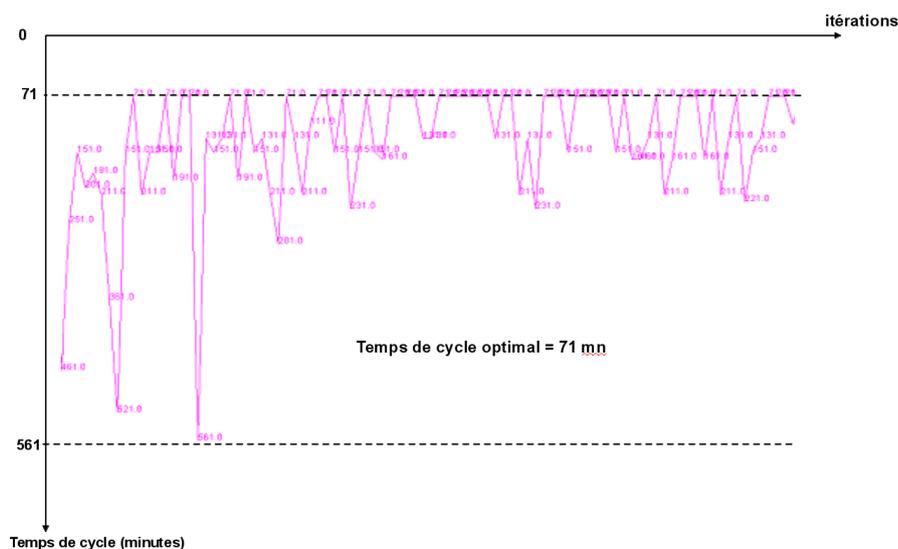


FIGURE 2.5 – Résultats des temps de cycle obtenus à chaque itération

Une autre approche développée en parallèle pour la reconfiguration [Berruet et al., 2004] (B.17), [Kindler et al., 2004] (A.6), est basée sur la *simulation imbriquée*. Ce travail a été réalisé avec E. Kindler de l'Université d'Ostrava, spécialiste du langage de simulation SIMULA et de la simulation imbriquée. L'approche est assez similaire dans le sens où, à la place des agents, l'approche objet a été retenue pour modéliser le système transitique. La simulation est réalisée directement par les objets qui sont capables de simuler plusieurs scénarios de fonctionnement en parallèle afin d'identifier une solution convenable. L'approche a été appliquée à la recherche d'une solutions d'ordonnancement en « temps réel » plus qu'à la reconfiguration mais le principe est similaire : il s'agit de simuler des chemins pour les produits afin de prendre une décision.

2.4 Conclusion

Ce travail a été très enrichissant sur plusieurs points. Tout d'abord, cela m'a permis de passer d'une problématique de recherche orientée pilotage pur (l'ordonancement) à une problématique intégrant l'ingénierie système avec la conception des systèmes transitiques. Cela m'a permis de développer mes connaissances dans le domaine de l'ingénierie système et de comprendre les premiers besoins de couplage entre processus de conception et autres processus de l'ingénierie système (ici le support à l'utilisation et le pilotage). Ces connaissances ont été exploitées ensuite dans l'activité de planification de projets d'ingénierie système développée dans le chapitre suivant (chapitre 3). Ensuite, au cours de ce travail, j'ai eu l'opportunité de réaliser mon premier encadrement d'un stagiaire de DEA (Mohcen Benlagha). Cette collaboration a été très enrichissante sur les plans personnel et humain. Enfin, d'un point de vue scientifique, ces travaux ont permis d'apporter quelques éléments supplémentaires au domaine de la reconfiguration des systèmes à événements discrets avec une application aux systèmes transitiques. L'utilisation d'un algorithme de fourmis permet de simuler divers scénarios lors de la perte de certaines fonctionnalités du système transitique et d'identifier des solutions permettant au système d'être reconfiguré. L'utilisation première d'un algorithme ACO (l'optimisation) est détournée afin de permettre aux fourmis d'aller chercher des chemins possibles. L'intérêt est tout de même de guider l'algorithme par l'expérience des fourmis (formalisée par les traces de phéromones) et de converger vers des solutions optimales. Cette idée de guider les choix par des tirages aléatoires biaisés par des connaissances issues de l'expérience est exploité en planification de projets dans le chapitre 3.

Les contributions de ces travaux sont les suivantes :

Contribution 2.1 : Le développement d'une approche par systèmes multiagents pour la conception des systèmes transitiques. L'approche par composants développée au LESTER a été étendue aux systèmes multiagents afin de rendre le modèle plus flexible, de faciliter la simulation et de permettre l'implémentation directe sur des contrôleurs dédiés.

Contribution 2.2 : L'intégration du processus de conception des systèmes et de leur commande avec le processus d'exploitation et le processus support pour la reconfiguration. La reconfiguration faisant partie de la commande, sa conception est réalisée conjointement à celle du système transitique et simulée à des fins de validation au plus tôt dans le processus de conception. Cette même commande est directement utilisée par les agents en phase d'exploitation du système transitique.

Contribution 2.3 : La définition d'une approche par algorithme de fourmis (Ant Colony Optimisation) pour la reconfiguration. L'utilisation faite ici, outre la recherche de solutions de reconfiguration tendant vers l'optimum, est la simulation. Le critère de choix employé est la minimisation du temps de cycle pour les produits.

Encadrement : Ce travail a été abordé dans le stage de DEA de Mohcen Benlagha (M2R.1) pour la spécification du système multiagent permettant la modélisation.

Publications : Ce travail a été publié dans [Coudert et al., 2002] (B.26), [Coudert et al., 2003] (B.21).

Chapitre 3

Planification d'un projet d'ingénierie système

3.1 Introduction

Dans le chapitre 1, nous avons exprimé le besoin d'interaction entre les processus de planification d'un projet d'ingénierie système et le processus d'ingénierie système lui-même. Deux exigences ont été exprimés : i) le besoin d'un outil de synchronisation de ces processus permettant une bonne gouvernance en évitant d'instaurer une hiérarchie entre planificateurs et concepteurs, en exploitant des connaissances méthodologiques ; ii) le besoin d'un outil de planification de projet en phase de conception préliminaire, guidé par des connaissances, afin de permettre au décideurs de réaliser des choix optimaux le plus tôt possible en conception et en planification. Ainsi, dans la section 3.2, nous présentons de manière détaillée la problématique liée à la synchronisation, les travaux réalisés et le bilan des résultats obtenus. Dans la section 3.3, la problématique détaillée de l'optimisation est décrite ainsi que les travaux réalisés et les résultats obtenus. Nous terminons cette section par un bilan des encadrements, projets, communications et publications réalisés.

3.2 Synchronisation du processus de planification de projet avec le processus d'ingénierie système

3.2.1 Problématique détaillée de la synchronisation

Nous abordons dans cette section la synchronisation du processus de planification d'un projet d'ingénierie avec le processus d'ingénierie système. Nous rappelons brièvement la problématique globale exposée dans le chapitre 1. Cette problématique consiste à étudier les interactions entre ces deux processus afin de définir des outils adaptés permettant de favoriser leur couplage en exploitant des connaissances ad hoc. Dans notre approche, nous considérons qu'un environnement de planification de projet est couplé avec un environnement d'ingénierie système afin de planifier (et donc cadrer) toute activité devant se dérouler en ingénierie système. Des demandes pouvant émaner de chaque partie à tout instant, des outils de couplage doivent permettre de synchroniser parfaitement les échanges sans favoriser un processus par rapport à l'autre. De plus, cette synchronisation doit pouvoir s'effectuer en utilisant un outils d'aide à la décision informatisé. Un tel outils a été proposé dans le projet ANR ATLAS (logiciel ATLAS). Les modalités de mise en œuvre des modes de couplage informationnel et comportemental ont été étudiées dans la thèse de Joël Abeille (PhD.2) dans le cadre du projet ANR ATLAS. Les entités que nous avons considérées sont issues de la planification de projet et de l'ingénierie système. En fait, nous avons orienté nos travaux vers l'activité de conception de systèmes. Ce choix a été dicté par l'utilisation du standard EIA-632 [Martin, 2000] dans le projet ATLAS qui se concentre sur la partie conception de systèmes dans le processus général d'ingénierie système.

Dans la littérature, le couplage de ces deux processus a été abordé et nous en dressons un rapide panorama. Des modèles basés sur la conception axiomatique (*Axiomatic Design* [Suh, 1990]) ont été proposés dans [Goncalves-Coelho, 2004]. Les quatre domaines de la conception axiomatique (domaine clients CN, domaine fonctionnel FR, domaine physique DP et domaine processus PV) sont couplés en utilisant une approche matricielle. De manière assez proche, [Danilovic and Browning, 2007, Schoettl and Lindemann, 2014] utilisent une approche par matrices DSM (*Design Structure Matrix*) et DMM (*Domain Mapping Matrix*). Une matrice DSM représente les relations entre éléments d'un système au sein d'un même domaine de la conception axiomatique. Une matrice DMM représente les relations entre éléments de deux domaines. L'aspect planification est pris en compte dans des

travaux comme [Chen et al., 2003, Maheswari and Varghese, 2005] où des matrices DSM permettent de représenter des précédences entre tâches afin de les ordonner. Ces approches sont efficaces pour modéliser de manière statique les liens entre domaines liés à la conception et domaines liés à la planification mais ne permettent pas d'envisager un outillage dynamique des interactions. Nous citons tout de même les travaux de [Stewart and Tate, 2000] qui ont outillé la conception axiomatique par un logiciel ad hoc couplé avec le logiciel de planification de projets Microsoft Project. Les paramètres de conception sont couplés aux exigences par une matrice et transformés ensuite en tâches dans un diagramme de Gantt. Dans [Lu et al., 2008], les auteurs proposent une approche où une structure de projet (Working Breakdown Structure - WBS) décrivant les travaux à réaliser est dérivée directement d'une structure produit (Product Breakdown Structure - PBS) et formalisée dans une matrice. Dans [Sharon et al., 2009, Sharon et al., 2011, Sharon et al., 2013], les auteurs proposent des travaux très proches des standards d'ingénierie système INCOSE. Leur approche PPLM (Project Product Lifecycle Management) permet de définir un environnement commun à l'ingénierie système et la planification de projet. Le point commun à l'ensemble des approches est de définir les tâches à planifier une fois la structure du produit définie. Ceci peut se justifier si les tâches à planifier sont celles de production du système. En revanche, si le travail de développement lui-même doit être planifié, on doit être en mesure de coupler plus étroitement les deux processus.

Notre **problématique détaillée** est exprimée ainsi : il s'agit de développer une approche intégrée dans laquelle chaque processus (planification de projet de conception de systèmes et processus de conception) fonctionne à partir d'informations couplées et issues des deux domaines. Toute information créée par le processus de planification doit générer la création d'une information couplée par le processus d'ingénierie système et inversement. Chaque domaine doit pouvoir initier la création d'une information et demander à l'autre de créer la sienne. Pour cela, il faut pouvoir se baser sur des **connaissances méthodologiques** et mettre en œuvre un **outil de couplage informationnel** associé à un **outil de couplage comportemental**. Le couplage informationnel permet de s'assurer de la bonne intégrité des données tout en conservant la sémantique propre à chaque domaine. Le couplage comportemental met en œuvre un processus permettant de garantir que les informations propres aux deux domaines restent couplées, c'est-à-dire que chaque création d'une entité d'un domaine mène à la création de l'entité couplée dans l'autre domaine. Des éléments de synchronisation doivent permettre la création concertée des différentes informations en garantissant leur intégrité. La section suivante (section 3.2.2) permet d'exposer nos contributions quant au couplage informationnel (section 3.2.2.1) et au couplage comportemental (section 3.2.2.2).

3.2.2 Développements

3.2.2.1 Le couplage informationnel

Les processus à coupler sont représentés sur la figure 3.1 avec les informations qu'ils génèrent. La représentation de ces processus est volontairement simplifiée. Nous considérons que le processus de planification est composée d'une activité de Définition / Planification des tâches suivie d'une activité de contrôle d'exécution. Il s'agit d'abord de définir/planifier la Tâche de recueil des Exigences système (tâche TE), puis de l'exécuter. Ensuite, il s'agit de définir/planifier les Tâches de Développement de solutions (tâche TD) envisagées à la fin du recueil des exigences (les solutions sont appelées *Alternatives Système* - AS dans nos travaux). Le processus de conception de systèmes est composé de la Tâche de recueil des Exigences système suivi de une ou plusieurs Tâches de Développement de solutions

(tâche TD). La mise en œuvre de ces deux processus génère des informations de planification et des informations sur le système conçu, voire réalisé.

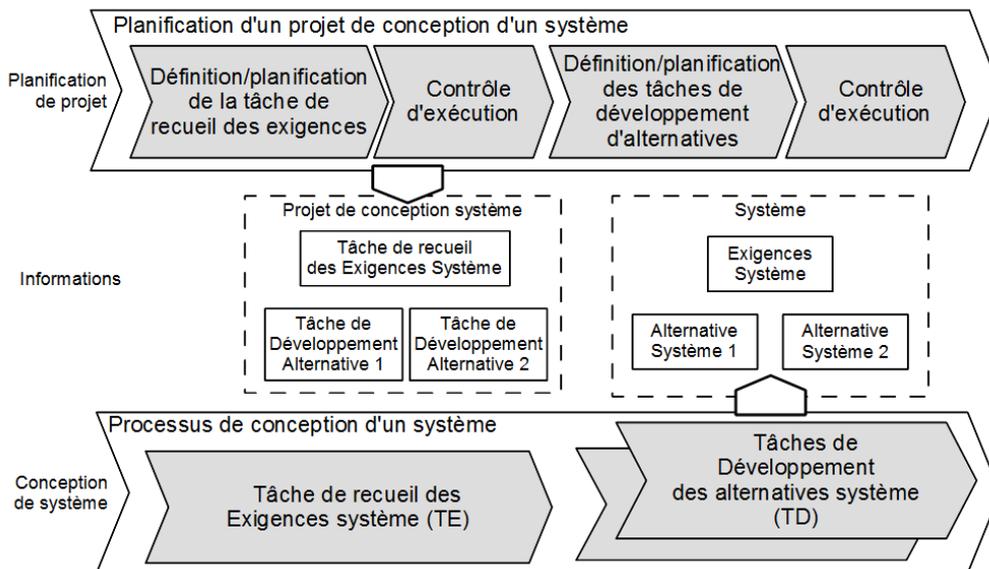


FIGURE 3.1 – Processus de planification et de conception avec les informations générées

Le couplage informationnel est un outil qui va permettre d'exploiter un modèle de données assurant que les entités de planification sont couplées aux entités de conception et ce, de manière récursive. En effet, chaque alternative peut être composée de sous-systèmes dont le développement peut être dévolu à des équipes distinctes de développeurs dont les activités nécessitent d'être planifiées au sein d'une structure projet propre. Ainsi, le modèle que nous avons proposé est représenté sur la figure 3.2. Ce modèle constitue le premier volet de la connaissance méthodologique qui doit être mise en œuvre à chaque nouveau projet de conception.

Le choix d'une bijection entre entités de planification et entités de conception a été discuté dans [Abeille et al., 2010] (B.10), [Coudert et al., 2011a] (B.8), [Vareilles et al., 2012b] (B.6) ainsi que dans la thèse de Joël Abeille [Abeille, 2011] (PhD.2). Dans ce choix, un système est associé à son projet de conception. La décomposition du système en sous-systèmes entraîne la décomposition du projet en sous-projets et inversement. Ceci assure une structure projet parfaitement en adéquation avec la structure système. Ce modèle ne permet pas de synchroniser à proprement parler les processus entre eux. Un processus générique, exploitant des attributs de *faisabilité* et de *vérification* intrinsèques aux entités, permet cela et fait l'objet de la section suivante.

3.2.2.2 Le couplage comportemental

La synchronisation des processus doit être outillée afin de proposer aux acteurs de l'ingénierie système un outil d'aide leur permettant de gérer leurs activités et, de manière plus générale, les informations définies dans le modèle de couplage informationnel de la figure 3.2. Pour cela, nous avons identifié trois acteurs dont les rôles sont les suivants :

- le **responsable de planification** a la responsabilité des entités de planification pour un niveau de décomposition donné. Son rôle est de définir un projet de conception correspondant à son niveau,

3.2. Synchronisation du processus de planification de projet avec le processus d'ingénierie système

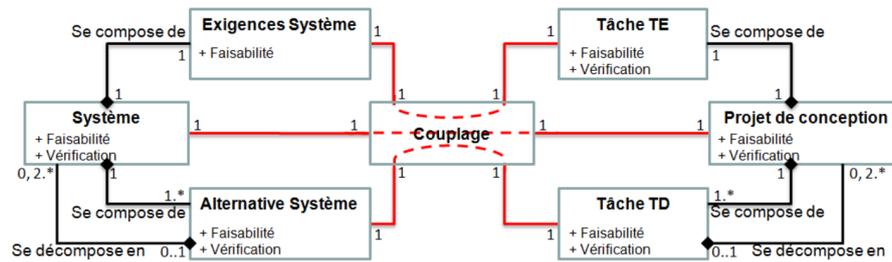


FIGURE 3.2 – Modèle de couplage informationnel [Abeille, 2011]

c'est-à-dire de définir les tâches TE et TD (durées, délais, coûts, ressources, etc.) correspondant au système à concevoir, de proposer des plannings pour leur réalisation et d'en assurer le suivi de réalisation,

- le **responsable de conception** a la responsabilité des entités de conception pour un niveau de décomposition donné. Son rôle est de lancer et gérer la réalisation des tâches TE et TD selon les plannings fournis par le responsable de planification,
- le **responsable de programme** nomme les responsables de planification et de conception, réalise le suivi global du projet et les arbitrages nécessaires et définit les orientations du projet et du système à concevoir dans ce projet. Éventuellement, il peut être en relation avec le client duquel il obtient les besoins que le futur système doit satisfaire.

Ces trois acteurs sont impliqués dans le processus assurant le couplage comportemental. Nous avons représenté ce processus à l'aide du formalisme BPMN (*Business Process Modelling Notation*) dans lequel des « participants » (représentés par des lignes (ou « bassins ») sur la figure 3.3. Quatre participants apparaissent : trois d'entre eux sont les responsables cités ci-dessus. Le quatrième correspond à l'outil d'aide à la décision, c'est-à-dire la plate-forme logicielle chargée de créer les entités et permettre leur renseignement synchronisé. Le processus permet de faire en sorte que les informations système et celles de projet soient renseignées quasi-simultanément. Ainsi, chaque tâche TE ou TD est cadré par un planning établi préalablement en ayant un niveau de connaissances maximal sur le problème à traiter (nombre de solutions à développer, choix de décomposition, exigences à satisfaire, compétences requises, etc.). A la fois le responsable de planification et le responsable de conception sont en mesure de prendre des décisions de création d'entités (solutions, décompositions) et d'en avertir immédiatement l'autre partie grâce à la plate-forme logicielle. Ce processus est récursif dans la mesure où toute demande de décomposition menant à la demande de conception d'un sous système mène, au préalable, à la demande de création, planification et mise en œuvre d'un projet associé.

Afin de parfaitement synchroniser les processus, nous avons introduit des attributs permettant de caractériser les entités : la faisabilité et la vérification (figure 3.2). D'après l'AFNOR, *la faisabilité est l'aptitude d'un produit, processus ou service étudié à être élaboré techniquement et dans des conditions économiques satisfaisantes*. La vérification est la confirmation par des preuves tangibles que les exigences spécifiées ont été satisfaites [Faisandier, 2012]. Ainsi, les entités de planification et de conception sont dotées de ces attributs (à l'exception de l'entité Exigences Systèmes qui ne dispose pas de l'attribut de vérification, l'analyse de faisabilité garantissant que les exigences sont cohérentes et non-contradictoires). Nous avons étudié l'ensemble des possibilités d'évolution de la valeur de ces attributs (Non Déterminée - ND, Faisable, Non-Faisable, Vérifiée, Non-Vérifiée) et formalisé cela à l'aide des diagrammes d'états-transitions. Cela nous a permis de déterminer une liste de 28 règles régissant la

progression du processus intégré de la figure 3.3.

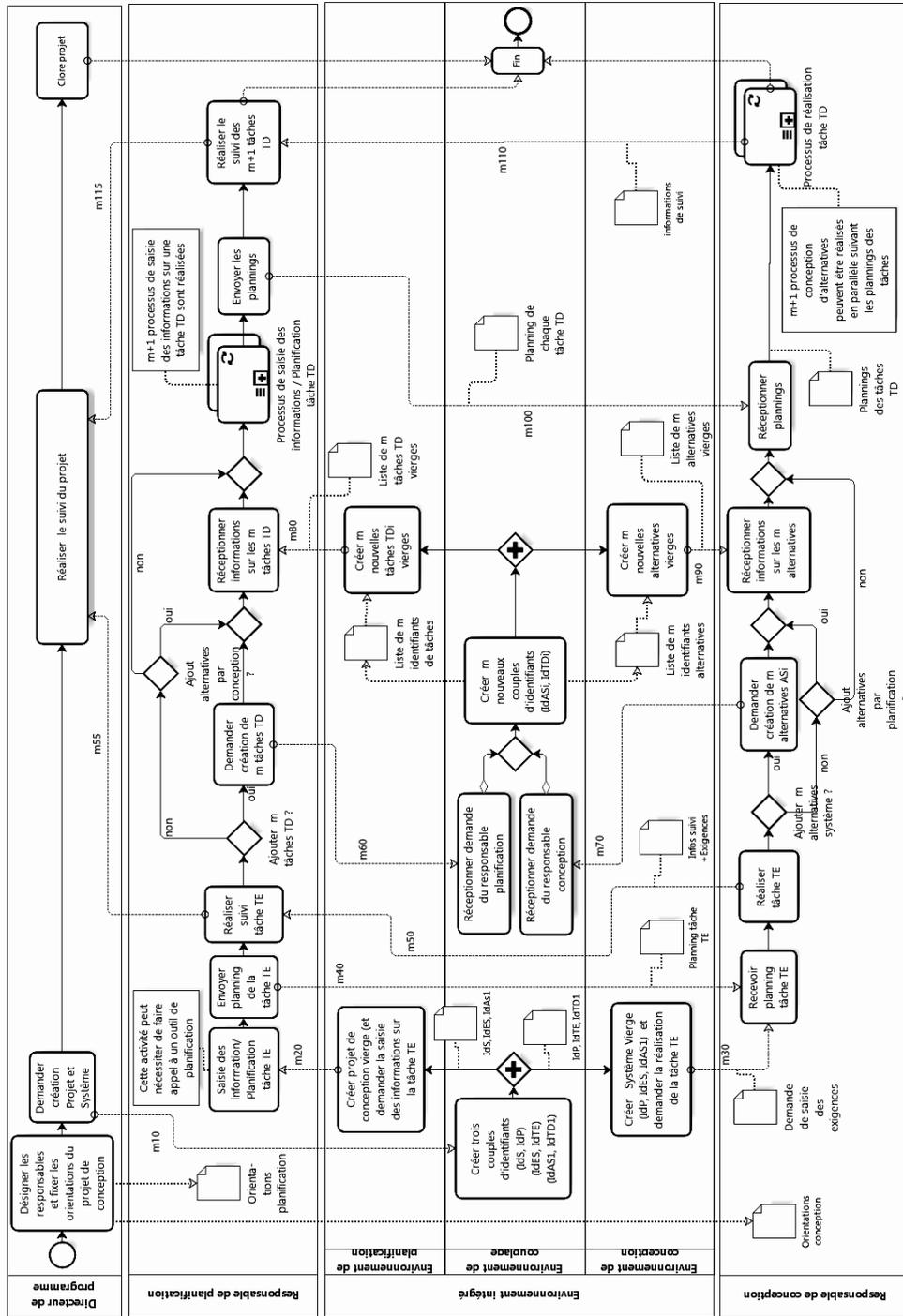


FIGURE 3.3 – Processus pour le couplage comportemental [Abeille, 2011]

En guise d'illustration, un diagramme états-transitions partiel correspondant aux attributs de faisabilité (Fa) des exigences système ES et de faisabilité et de vérification de la tâche TE associée est représenté sur la figure 3.4. De la même manière, nous donnons deux règles de synchronisation :

3.2. Synchronisation du processus de planification de projet avec le processus d'ingénierie système

$R.1 = (TE.Fa \neq OK) \Rightarrow (ES.Fa = ND)$; $R.2 : (ES.Fa = ND) \Rightarrow (TE.Ve = ND)$. La règle R.1 signifie que tant que la faisabilité d'une tâche de recueil des exigences n'est pas assurée, la faisabilité des exigences ne peut être évaluée. La règle R.2 signifie que tant que la faisabilité des exigences système n'a pas été étudiée, la vérification de la tâche TE (au regard des exigences de projet) ne peut pas être déterminée.

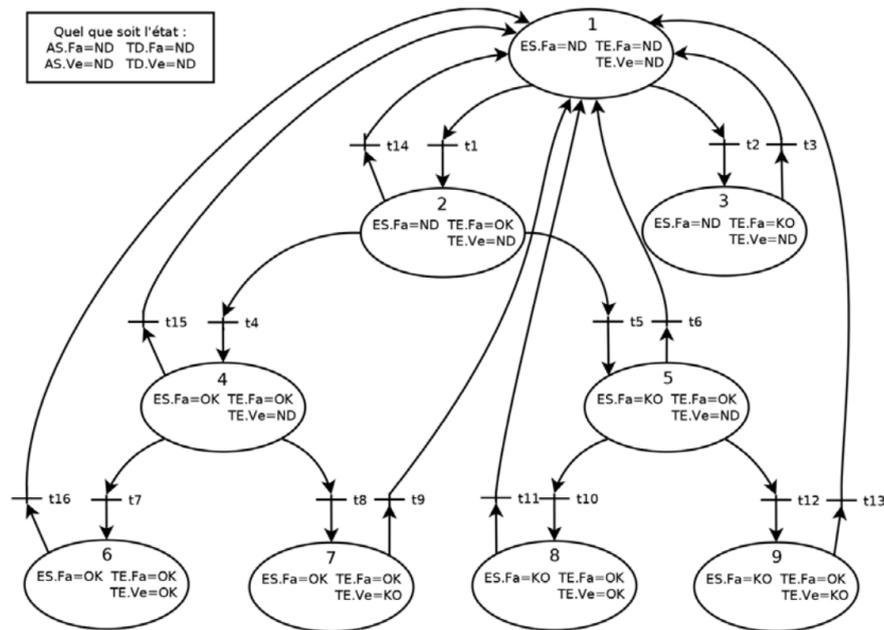


FIGURE 3.4 – Diagramme états-transitions partiel correspondant aux attributs de faisabilité et de vérification d'une alternative système AS et de faisabilité et de vérification de la tâche TD associée [Abeille, 2011]

In fine, les résultats obtenus sont les couplages comportementaux représentés sur la figure 3.5 où les arcs représentent les contraintes de précédence entre attributs. Les arcs inter-processus représentent les couplages comportementaux pour un projet de développement d'un système à un niveau donné.

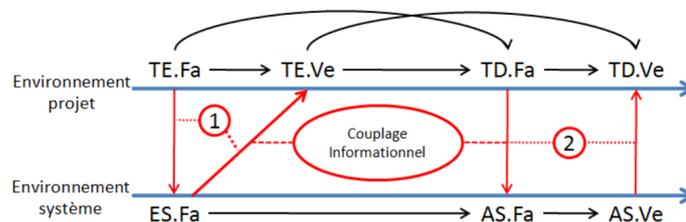


FIGURE 3.5 – Couplages comportementaux [Abeille, 2011]

Ainsi, le processus intégré, les règles de synchronisation et les couplages comportementaux constituent le second volet des connaissances méthodologiques qui doivent être mises en œuvre par l'outil d'aide à la décision (la plate-forme logicielle ATLAS). Le modèle, le processus intégré et les règles de synchronisation ont permis de développer le logiciel ATLAS.

3.2.3 Bilan Partiel

Ce travail a constitué une part importante de la contribution au projet ANR ATLAS entre 2008 et 2011. La formalisation du couplage informationnel et du couplage comportemental a en effet permis de spécifier et développer l'outil logiciel ATLAS. Selon ces deux modes de couplage, des connaissances méthodologiques ont été formalisées en deux volets complémentaires :

- des connaissances basées sur les informations couplées Planification de projet / Conception de systèmes et le couplage informationnel. L'exploitation de ces connaissances permet de garantir qu'au cours du temps, les informations définies par les acteurs de la planification et ceux de la conception demeurent cohérentes, intègres et équilibrées,
 - des connaissances basées sur un processus intégré de planification et de conception permettant de garantir une bonne synchronisation des décisions et actions des planificateurs et des concepteurs.
- Les travaux liés à cette problématique ont mené aux contributions suivantes :

Contribution 3.1 : L'étude des interactions entre le processus de planification de projets de conception et le processus de conception de systèmes a permis d'appréhender leur intégration en analysant et favorisant les échanges.

Contribution 3.2 : La définition d'un outil de couplage informationnel mettant en œuvre le premier volet de connaissance méthodologique : le modèle de couplage informationnel. Ce modèle, défini à l'aide d'UML permet de garantir que, pour un niveau de décomposition donné, les informations de planification du projet inhérent au développement d'un système sont couplées aux informations de conception de ce système.

Contribution 3.3 : La définition d'un outil de couplage comportemental mettant en œuvre le second volet de connaissance méthodologique : le processus de couplage comportemental. Ce processus intégré, défini à l'aide du formalisme BPMN permet de synchroniser planification de projet et conception de système. L'exploitation des attributs de faisabilité et de vérifications propres aux entités de planification et de conception a permis de définir des règles de synchronisation directement exploitables pour développer le logiciel ATLAS.

Encadrement : Ce travail a été traité dans la première partie de la **thèse de Joël Abeille** [Abeille, 2011] (PhD.2).

Projet : Ce travail a été adossé et a contribué au **projet ANR ATLAS**.

Publications : Ce travail a été publié dans [Aldanondo et al., 2011] (E.1), [Abeille et al., 2009] (C.5), [Abeille et al., 2010] (B.10), [Coudert et al., 2011a] (B.8), [Vareilles et al., 2012b] (B.6).

3.3 Optimisation guidée par les connaissances

3.3.1 Problématique détaillée de l'optimisation

Nous abordons dans cette section la problématique détaillée de l'optimisation de la sélection de scénarios en planification de projet et conception de systèmes. L'interaction de ces deux processus et la nécessité de points de couplages ont été identifiés et leur outillage décrit dans la section précédente. L'objectif de ces travaux, formalisés dans la thèse de Paul Pitiot (PhD.1), est de proposer un outil d'optimisation permettant de faire des choix opportuns, voire optimaux, lors des phases amont d'un projet d'ingénierie système dans lequel bon nombre d'acquis peuvent être réutilisés et la consultation des expériences passées (ou simulées) peut être bénéfique. Nous nous plaçons dans le cadre d'une conception de systèmes dans laquelle un nouveau système à concevoir va réutiliser des solutions, des architectures ou des technologies existantes, avec toutefois la possibilité d'injecter une part d'innovation. Dans nos travaux sur l'étude des interactions entre le processus de planification de projet et celui de conception de systèmes, dès les phases amont, c'est-à-dire lors de la phase de définition du système et de conception préliminaire, un modèle dans lequel un ensemble de choix possibles et connus de conception et de planification est créé. Nous entendons par choix de conception l'ensemble des possibilités de structuration d'un système, les solutions envisageables, les technologies connues, les fournisseurs possibles, etc. Les choix de planification, quant à eux, concernent essentiellement les choix de réalisation, acquisition ou sous-traitance des sous-systèmes ainsi que d'intégration de sous-systèmes entre eux. Par exemple, pour un sous-système, plusieurs solutions d'obtention pourront être représentées : réalisation en interne avec différentes ressources, sous-traitance, acquisition chez divers fournisseurs, etc. Chaque choix modifie le temps de cycle total ainsi que le coût total. Ainsi, nous avons formalisé ces possibilités au sein d'un graphe de projet (voir figure 1.5 - page 49) dans lequel il s'agit maintenant d'identifier des scénarios optimaux vis-à-vis de plusieurs objectifs. Dans nos travaux, nous avons considéré deux objectifs : le coût et le temps de cycle. Il s'agit donc de rechercher les scénarios les moins coûteux et dont le temps de cycle est le plus faible possible. Dans notre problématique globale, nous avons précisé le choix d'un algorithme évolutionnaire pour rechercher les meilleurs scénarios en guidant l'algorithme à l'aide de connaissances formalisées dans un modèle à base de réseaux bayésiens. Ce modèle (connaissances décisionnelles - voir section 1.4.3.2, page 55) est construit à partir d'un processus d'apprentissage mis en œuvre sur des expériences obtenues soit réellement lors de la réalisation de projets similaires, soit par simulation lors du déroulement du processus de résolution. Plusieurs modèles d'algorithmes évolutionnaires multiobjectifs existent dans la littérature de même que des techniques d'apprentissage et de guidage. Nous présentons un panorama d'approches ci-dessous.

Lorsque le problème à optimiser est multiobjectif, une manière très efficace de le traiter est de considérer non pas une unique solution optimale comme en optimisation mono-objectif, mais de considérer un ensemble de solutions pareto-optimales appartenant à une surface de compromis dans l'espace des objectifs. Ces solutions ont la particularité de n'être *dominées* par aucune autre et constituent donc des solutions de compromis entre tous les objectifs. La dominance au sens de Pareto peut être exprimée ainsi : considérant deux vecteurs de valeurs d'objectifs v et u , on dit que v domine u au sens de Pareto (noté $v \prec u$) si toutes les composantes de v sont inférieures ou égales à celles de u et s'il existe au moins une composante strictement inférieure [Siarry, 2014]. Les solutions qui ne sont dominées par aucune autre appartiennent à la *surface de compromis* également appelée *front de Pareto*. Parmi les algorithmes évolutionnaires multiobjectifs, les approches basées sur un classement de Pareto sont apparues depuis les années 1990. Nous pouvons citer les méthodes MOGA

[Fonseca and Fleming, 1993], NPGA [Horn et al., 1994], NSGA [Srinivas and Deb, 1994], NSGA-II [Deb et al., 2002], SPEA [Zitzler and Thiele, 1999] ou encore SPEA-II [Zitzler et al., 2001]. Le nombre d'individus appartenant au front de Pareto peut être très grand. Ceci ne facilitant pas le travail du décideur, la méthode SPEA-II propose de réduire le nombre de solutions en ne conservant que des solutions équitablement réparties dans les meilleures zones de l'espace des objectifs. Des regroupements sont donc réalisés (*clusters*) afin de ne conserver que des individus représentants de chaque groupe les plus différents possibles. Il s'agit du principe de l'élitisme qui garantit de bonnes performances aux algorithmes [Zitzler et al., 2001]. C'est cette méthode d'optimisation qui a été retenue dans nos travaux. La possibilité de guidage est favorisée par l'utilisation d'un algorithme évolutionnaire car les opérateurs peuvent être aisément biaisés. Un objectif de guidage, outre le fait de rendre l'algorithme plus performant, est de répartir uniformément les solutions sur le front de Pareto.

Nous avons vu dans la problématique globale de la section 1.4.2.3 qu'un modèle de connaissance, obtenu par apprentissage sur des expériences (ou des exemples) était utile. L'apprentissage part d'un ensemble d'expériences. La construction du modèle de connaissances correspond à l'exécution d'un processus d'induction à partir des expériences disponibles, c'est-à-dire à la génération de lois décrivant le problème par généralisation d'observations. Il existe pour cela différents principes inductifs comme par exemple la minimisation du risque empirique, la règle de Bayes, le gain en information, etc. [Denis, 2000]. D'un point de vue probabiliste, les méthodes d'induction font en général appel au principe de Bayes consistant à définir une probabilité « a priori » sur un ensemble d'hypothèses et à faire évoluer cette probabilité selon les observations disponibles. Parmi ces modèles, les **réseaux bayésiens** [Pearl, 1988] offrent des caractéristiques intéressantes car ils combinent les avantages de la théorie des graphes et de la théorie des probabilités en représentant à la fois les variables mais aussi leurs relations de dépendance et d'indépendance. Les réseaux bayésiens constituent une technique d'acquisition, de représentation et de manipulation de connaissances [Naïm et al., 2007]. Un réseau bayésien se présente sous la forme d'un graphe acyclique composé de nœuds représentant les variables du problème et d'arcs orientés représentant les dépendances entre variables. A chaque nœud est associée une variable dont l'état ou la valeur dépend de l'état des nœuds parents selon une *Table de Probabilités Conditionnelles* associée au nœud (TPC). L'**inférence** dans un réseau bayésien consiste à propager des informations dans le réseau afin de modifier les probabilités dans les nœuds. L'**apprentissage d'un réseau bayésien** à partir d'un ensemble d'individus se compose de l'apprentissage de la structure du réseau (liens entre nœuds) et de l'apprentissage des paramètres (TPC des nœuds). A partir d'une structure donnée, l'apprentissage de paramètres consiste à rechercher les probabilités qui décrivent le mieux les exemples disponibles. L'apprentissage de structure consiste à rechercher la structure du réseau mais nous n'abordons pas cet aspect car la structure du réseau bayésien est construite à partir de la structure du graphe de projet et des connaissances expertes. Lorsque l'apprentissage doit être réalisé à partir de données incomplètes, la méthode la plus générale est basée sur l'algorithme itératif *Expectation-Maximisation* (EM) décrit initialement dans [Dempster et al., 1977].

Des approches telles que l'approche *Bayesian Optimization Algorithms* (BOA) [Pelikan et al., 2007] permettent d'exploiter directement un réseau bayésien pour faire de l'optimisation par apprentissage sur des individus performants. En revanche, ces approches ne tiennent compte ni des objectifs, ni de la diversité du front de Pareto. Analysées dans la thèse de Paul Pitiot [Pitiot, 2009] (PhD.1), des approches d'*optimisation évolutionnaire intelligente* [Huyet and Paris, 2004] existent dans la littérature. Ces approches améliorent les performances de la recherche en se basant non seulement sur la performance globale des individus, mais également sur la connaissance de l'influence des choix sur les performances. Parmi ces méthodes, citons les algorithmes culturels [Becerra and Coello-Coello, 2005]

ou les méthodes basées sur le principe de *Learnable Evolution Model* (LEM) [Michalski, 2000], [Jourdan et al., 2005]. Cependant, dans ces approches, les connaissances sont difficilement accessibles et exploitables par l'utilisateur avec un effet « boîte noire » incompatible avec une interaction avec un expert [Pitiot et al., 2010] (A.3).

Notre **problématique détaillée** est exprimée ainsi : le problème étant formalisé à l'aide d'un graphe de projet, il s'agit de rechercher un panel de solutions pareto-optimales (des scénarios) à l'aide d'un algorithme évolutionnaire de type SPEA-II. Afin d'être en mesure de guider cet algorithme, naturellement aveugle en raison des choix aléatoires qu'il réalise, l'utilisation d'un modèle de connaissances doit permettre de biaiser les probabilités des opérateurs de sélection, croisement et mutation. L'objectif est d'orienter la résolution vers des zones intéressantes de l'espace des objectifs, notamment en garantissant une bonne répartition des solutions sur le front de Pareto. Ce modèle de connaissances décisionnelles doit être en mesure de représenter les connaissances disponibles sur l'influence des choix de planification/conception représentés dans le graphe de projet sur les objectifs de coût et de temps de cycle à l'aide du formalisme des réseaux bayésiens. Ce modèle doit être obtenu par apprentissage en utilisant l'algorithme EM à partir des expériences simulées (les individus générés par l'algorithme évolutionnaire) ou bien réalisées. En outre, des connaissances expertes doivent pouvoir être directement injectées et ce modèle doit pouvoir servir d'outil d'aide à la décision pour le décideur en lui indiquant l'influence de ses choix sur la satisfaction des objectifs. Cette problématique est illustrée sur la figure 3.6.

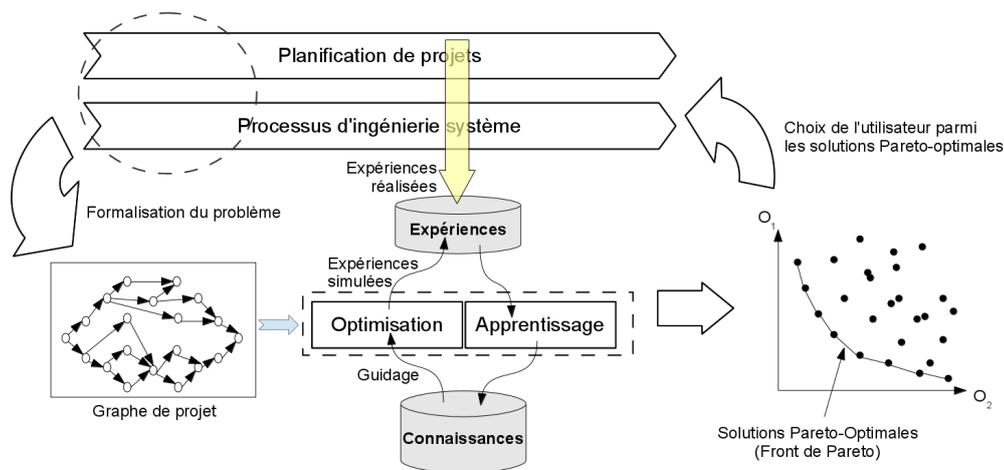


FIGURE 3.6 – Problématique détaillée de l'optimisation par algorithme évolutionnaire guidé par les connaissances décisionnelles.

3.3.2 Développements

Le modèle de connaissances décisionnelles est un réseau bayésien qui comporte trois types de nœuds : les nœuds *décision*, *concept* et *objectif* (figure 3.7). Les nœuds *décision* correspondent aux nœuds « XOR » du graphe de projet (c'est-à-dire aux décisions possibles). Les nœuds *objectif* correspondent aux objectifs à optimiser. Les nœuds *concepts* permettent aux experts de formaliser de la connaissance sur l'influence de certaines caractéristiques intrinsèques au projet ou propres à l'environnement du projet sur les objectifs. Pour ces dernières, il peut s'agir par exemple de connaissances

sur l'influence de la charge d'un sous-traitant sur les objectifs. Une charge « importante » peut avoir une influence négative sur certains d'entre eux. Les nœuds sont discrets : ils modélisent tous les états possibles des entités modélisées. Cela nécessite de discrétiser les valeurs des objectifs selon des classes (par exemple *faible*, *moyen*, *fort*). Sans processus d'apprentissage, les probabilités sont uniformément réparties sur les états possibles des nœuds (l'espace de recherche est considéré comme uniformément intéressant). Les probabilités peuvent être mises à jour par apprentissage sur des expériences simulées, réalisées, ou encore directement renseignées par un expert. Cependant, les expériences peuvent contenir moins d'informations que le modèle de connaissances n'en comporte. Par exemple, la structure du problème représentée par le graphe de projet peut ne pas correspondre exactement à la structure du modèle de connaissances en raison d'évolutions ou d'innovations apportées dans le projet courant. L'algorithme d'apprentissage EM permet alors d'apprendre à partir ces informations incomplètes. Les

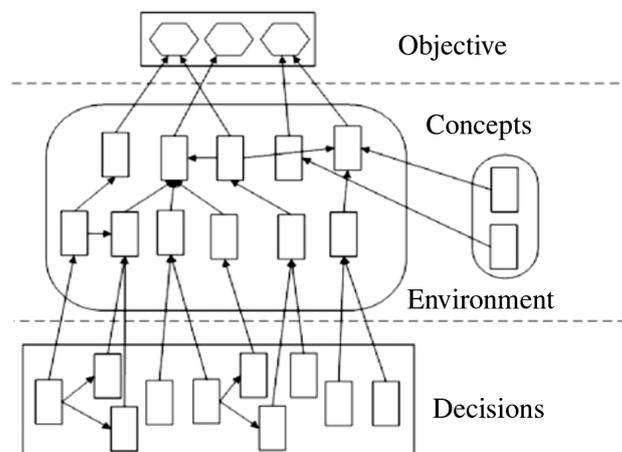


FIGURE 3.7 – Modèle de connaissances décisionnelles [Pitiot et al., 2010]

classes de valeurs d'objectifs sont obtenues à partir des états possibles pour les objectifs (figure 3.8). Lors de l'optimisation, seules certaines zones de l'espace des objectifs sont intéressantes. Les solutions que le décideur souhaite visualiser appartiennent au front de Pareto. Le front de Pareto idéal que nous tentons d'obtenir par guidage correspond à des solutions réparties équitablement sur les différentes classes de valeurs d'objectifs (zones C0 à C4 sur l'exemple de la figure 3.8). L'exploitation de ce modèle par les décideurs va s'opérer en définissant des *évidences* dans le modèle. Ainsi, fixer les probabilités de certaines classes de valeurs d'objectifs à 1 permet, par inférence, de calculer les probabilités de chaque décision possible dans le réseau bayésien. Ces probabilités correspondent alors aux probabilités d'atteindre la zone considérée dans l'espace des objectifs. Par exemple (figure 3.8), pour la classe C2 (*faible coût et faible temps de cycle*), nous obtenons des probabilités pour toutes les décisions. Ce sont ces probabilités, associées à chaque gène dans une solution, qui permettent ensuite de guider les opérateurs évolutionnaires. Les états « inhibés » de certains nœuds décision correspondent à des branches du graphe de projet qui sont devenues inaccessibles en raison de choix réalisés en amont. Les probabilités associées sont alors fixées à -1 afin de ne pas être considérées par le guidage.

Pour nos développements, le logiciel de réseaux bayésiens Netica a été utilisé et l'algorithme évolutionnaire SPEA-II, modifié pour être guidé par les connaissances (figure 3.9), c'est-à-dire par les probabilités du réseau bayésien, a été implémenté sur une plate-forme logicielle en langage C++. L'initialisation, la mutation, le croisement sont guidés par le modèle de connaissances décisionnelles (voir

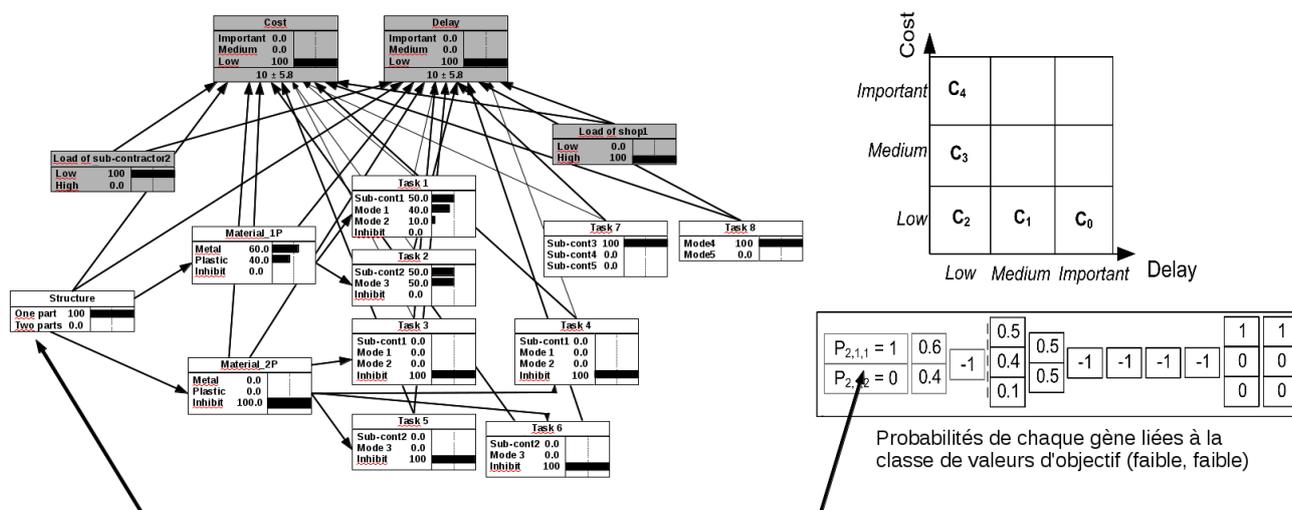


FIGURE 3.8 – Modèle de connaissances, probabilités et classes d'objectifs [Pitiot et al., 2010]

l'article [Pitiot et al., 2010] (A.3) pour le fonctionnement détaillé du guidage). La mise à jour du modèle de connaissances décisionnelles en fin de cycle correspond à la phase d'apprentissage à l'aide de l'algorithme EM implémenté dans Netica.

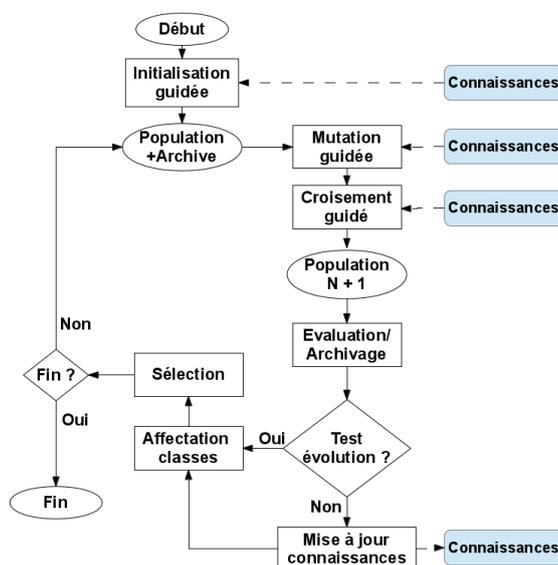


FIGURE 3.9 – Algorithme SPEA-II modifié

A partir d'un générateur de graphes intégré dans la plate-forme, nous avons évalué les performances de l'algorithme. Différentes stratégies ont été testées et comparées par rapport à l'algorithme SPEA-II nominal (cette stratégie est notée *EA*). Nous donnons ici quelques résultats partiels en guise d'illustration pour un problème de taille moyenne (35 tâches et 47 nœuds « XOR »). Nous avons testé la stratégie pour laquelle, dès le départ, les probabilités sont uniformément réparties dans le modèle de connaissances décisionnelles, un apprentissage étant réalisé sur la population toutes les x générations

(stratégie notée $EAOK_x$). Nous avons également testé la stratégie pour laquelle le modèle de connaissances initial comporte des connaissances acquises soit de manière experte, soit à partir d'instances plus petites du problème (stratégie notée $EAOK_{init}$).

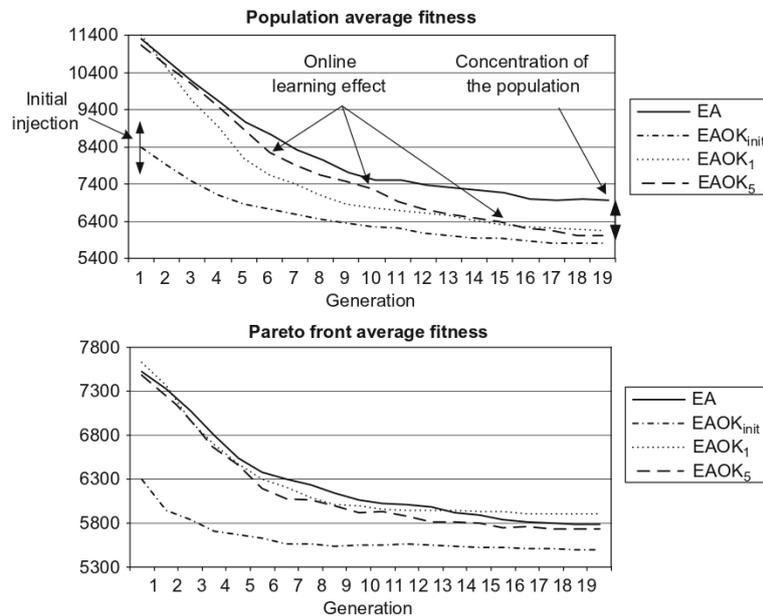


FIGURE 3.10 – Résultats partiels de l'algorithme guidé par les connaissances [Pitiot et al., 2010]

La stratégie $EAOK_{init}$ offre de bonnes performances. L'écart significatif initial par rapport à la stratégie non guidée EA correspond à l'injection des connaissances dès le départ. Après la vingtième génération, la performance moyenne des individus du front de Pareto est améliorée de 4.82% par rapport à la stratégie EA . La stratégie $EAOK_x$ donne également de bons résultats. L'apprentissage en cours de résolution toutes les x générations améliore la performance de l'algorithme. Nous pouvons noter une meilleure efficacité de la stratégie $EAOK_1$ par rapport à un apprentissage toutes les 5 générations ($EAOK_5$) avec une inversion après la seizième génération. Cela s'explique par le fait que la stratégie ($EAOK_5$) laisse les individus s'améliorer et se diversifier entre deux apprentissages ce qui n'est pas le cas de la stratégie ($EAOK_1$). Les résultats complets des différentes stratégies testées sur des problèmes de tailles diverses sont détaillés dans la thèse de Paul Pitiot [Pitiot, 2009] (PhD.1) ainsi que dans l'article [Pitiot et al., 2010] (A.3). Les tests réalisés montrent clairement que les performances sont largement améliorées lorsqu'on dispose a priori de connaissances décisionnelles.

Cet outil permet uniquement de sélectionner des scénarios. La planification proprement dite doit ensuite être réalisée à l'aide d'un autre outil prenant en compte la capacité des ressources.

3.3.3 Bilan Partiel des travaux en optimisation

Ce travail a permis de formaliser un outil d'aide à la planification de projets se basant sur des connaissances décisionnelles, c'est-à-dire des connaissances reflétant l'influence ou l'importance des décisions sur des résultats d'optimisation multicritère. Nous avons proposé une aide à la sélection de scénarios de projets à l'aide d'un algorithme évolutionnaire dont les opérateurs (sélection, croisement, mutation) sont guidés par les connaissances décisionnelles. Les connaissances décisionnelles sont obtenues par apprentissage sur des expériences soit réellement obtenues lors de la réalisation de projets similaires, soit artificiellement générées par l'algorithme évolutionnaire lui-même.

Ainsi, les travaux liés à cette problématique ont mené aux contributions suivantes :

Contribution 3.4 : Le développement d'un outil d'optimisation basé sur un algorithme évolutionnaire guidé par les connaissances permettant de sélectionner des scénarios intégrant à la fois la dimension projet et la dimension système. Un problème intégré projet/conception est représenté par un graphe de projet. L'outil permet la recherche de scénarios optimaux aux regard des objectifs de minimisation du temps de cycle total et du coût total du projet d'ingénierie système en répartissant au mieux les solutions sur un front de Pareto. L'outil correspond à un algorithme SPEA-II modifié.

Contribution 3.5 : Le développement d'un modèle de connaissances décisionnelles à l'aide d'un réseau bayésien représentant les influences des décisions en conception et planification de projet sur la satisfaction des objectifs. Le modèle est directement exploitable par l'algorithme SPEA-II modifié afin de le guider en biaisant les opérateurs évolutionnaires. Le modèle permet également la saisie par un expert de connaissances sur l'influence des caractéristiques intrinsèques ou extrinsèques d'un projet sur les objectifs d'optimisation. L'algorithme EM permet l'apprentissage des paramètres de ce réseau à partir des expériences simulées par l'algorithme évolutionnaire (les individus) ou d'expériences réalisées. Ce modèle, obtenu et exploité par le logiciel de réseaux bayésiens Netica permet en outre au décideur de consulter visuellement la connaissance contenue dans le réseau.

Encadrement : Ce travail a été abordé dans la **thèse de Paul Pitiot** [Pitiot, 2009] (PhD.1).

Publications : Ce travail a été publié dans [Pitiot et al., 2010] (A.3), [Pitiot et al., 2007a] (B.16), [Pitiot et al., 2007b] (B.14), [Pitiot et al., 2008] (B.13) et [Pitiot et al., 2009] (B.12).

3.4 Conclusion

Nous avons abordé dans ce chapitre la problématique de l'aide à la décision en planification d'un projet de conception de systèmes. Un premier volet, orienté par le projet ANR ATLAS concernait la définition des couplages entre processus de planification d'un projet d'ingénierie système et le processus d'ingénierie système lui-même. Nous avons mené des analyses auprès d'industriels montrant le manque d'outils (et de connaissances formalisées) permettant de faire interagir efficacement les deux processus. Un déséquilibre entre planificateurs et concepteurs existe et des problèmes de gouvernance apparaissent. Nous avons donc formalisé deux modes de couplage entre ces deux processus : le **couplage informationnel** et le **couplage comportemental**. Tout deux sont basés sur de la **connaissance méthodologique**. Le couplage informationnel est basé sur un modèle d'informations couplées entre Planification de projet/Conception de syst 'emes. Ce modèle garantit une bonne intégrité et une bonne cohérence des informations issues de la planification et de la conception. En outre, il impose de renseigner ces informations de manière intégrée. Le couplage comportemental est basé sur un processus générique permettant de garantir une bonne synchronisation entre les deux processus en favorisant les prises de décisions concertées et les échanges d'informations. Adossé à un ensemble de règles comportementales, ce processus constitue le second volet de la connaissance méthodologique. La formalisation des modes de couplage et des connaissances méthodologiques a constitué un élément clé dans le développement du logiciel ATLAS. Ils ont en effet permis de formaliser les besoins attendus pour un tel outil et ils ont également, par l'implémentation des règles, permis le développement lui-même. L'ensemble de ces propositions a constitué une première partie de la **thèse de Joël Abeille** [Abeille, 2011] (PhD.2). Il a été publié dans l'article de revue [Aldanondo et al., 2011] (E.1) ainsi que dans quatre conférences [Abeille et al., 2009] (C.5), [Abeille et al., 2010] (B.10), [Coudert et al., 2011a] (B.8), [Vareilles et al., 2012b] (B.6).

La seconde partie de ce chapitre concerne la formalisation d'un outil d'optimisation multicritère pour la sélection de scénarios lors des phases amont d'un projet d'ingénierie système. Dès les premières phases d'un projet d'ingénierie système, il est souvent possible de formaliser un ensemble de choix de planification et de conception (différentes possibilités de structuration d'un système, solutions envisageables, technologies connues, fournisseurs possibles, etc.). Les choix de planification, quant à eux, concernent essentiellement les choix de ressources, de réalisation, d'acquisition ou de sous-traitance des sous-systèmes ainsi que de leur intégration. La formalisation de ces choix et de leurs contraintes de séquençement au sein d'un graphe de projet nécessite ensuite la recherche de chemin optimaux, c'est-à-dire de scénarios optimisant certains critères. Nous avons donc proposé une approche par algorithme évolutionnaire multicritère (minimisation du coût et du temps de cycle) dans laquelle les opérateurs évolutionnaires, naturellement aveugles dans cette approche, sont biaisés par l'exploitation de connaissances décisionnelles, c'est-à-dire de connaissances sur l'influence des choix sur la satisfaction des objectifs. Les connaissances décisionnelles sont acquises par un processus d'apprentissage et formalisées sous forme de réseau bayésien. Les probabilités servent ensuite à guider le processus évolutionnaire. Ce travail a été abordé dans la **thèse de Paul Pitiot** [Pitiot, 2009] (PhD.1). Il a donné lieu à la publication [Pitiot et al., 2010] (A.3) ainsi qu'à quatre conférences internationales [Pitiot et al., 2007a] (B.16), [Pitiot et al., 2007b] (B.14), [Pitiot et al., 2008] (B.13), [Pitiot et al., 2009] (B.12). L'approche permettant d'hybrider : i) des techniques d'optimisation de type métaheuristique, ii) des connaissances décisionnelles et iii) les processus couplés de planification de projet et d'ingénierie système est une voie extrêmement intéressante à explorer plus avant (voir dans le chapitre de conclusion - chapitre 6).

Chapitre 4

Réutilisation d'acquis pour aider l'ingénierie système

4.1 Introduction

Nous abordons dans cette section la problématique de réutilisation d'expériences et de connaissances pour l'aide à la décision, particulièrement en ingénierie système. Les diverses activités d'un processus d'ingénierie système peuvent en effet être aidées par l'exploitation de connaissances et/ou d'expériences explicites par des outils adaptés. Cette problématique, transversale aux niveaux *Processus*, *Outils* et *Expériences/connaissances*, a été détaillée globalement dans le chapitre 1. Nous avons vu que trois cas étaient abordés dans nos travaux : la formalisation et l'exploitation de connaissances métier à l'aide d'ontologies ; la formalisation et l'exploitation d'expériences guidées par les connaissances métier ; la formalisation et l'exploitation de connaissances contextuelles guidées par les expériences. Ainsi, nous abordons de manière détaillée ces trois problématiques avec les développements effectués dans les thèses, les projets et les masters recherche dans les sections 4.2, 4.3 et 4.4. En fin de chacune de ces sections, un bilan partiel est dressé concernant les contributions, les encadrements et les publications. Ces éléments sont repris en conclusion de ce chapitre.

4.2 La formalisation et l'exploitation de connaissances métier

4.2.1 Problématique détaillée de la formalisation et de l'exploitation de connaissances métier

La connaissance métier est selon China [China, 1997] « constituée de la somme des connaissances nécessaires pour faire fonctionner le système, en vue d'atteindre des objectifs technico-économiques donnés et ce compte tenu des contraintes liées à l'environnement ». La formalisation de la connaissance métier permet, d'une part une meilleure efficacité dans la réalisation des processus et, d'autre part, facilite la transmission du savoir et de l'expertise des personnels [Béler, 2008]. L'utilisation de la notion d'*ontologie* (voir définition chapitre 1) est très répandue (un panorama est proposé par exemple dans [Richards and Simoff, 2001, Brandt et al., 2008]). Ainsi, nous proposons dans cette section de détailler la formalisation de connaissances métier (nous nous intéressons à des connaissances explicites directement exploitables de manière opérationnelle) à l'aide d'une ontologie de concepts afin de guider les décideurs dans leurs prises de décisions. L'application de ces travaux permet de faciliter le couplage entre conception de systèmes et planification de projets au sein de la plate-forme logicielle ATLAS.

Le domaine de l'ingénierie système utilise fréquemment les ontologies, notamment en ingénierie concurrente et collaborative où il s'agit de permettre à plusieurs équipes de conception de communiquer grâce à un langage commun [Roche, 2000, Kim et al., 2006]. Dans ce cas, les ontologies permettent de garantir une interopérabilité sémantique, c'est-à-dire la capacité de deux ou plusieurs concepteurs à se comprendre mutuellement [Zhang et al., 2003]. Une ontologie peut être un guide pour les concepteurs qui vont, à un niveau abstrait, initier la conception en recherchant dans l'ontologie les concepts s'appliquant le mieux au système à concevoir. L'ontologie doit donc permettre de faciliter l'utilisation d'un langage commun et la compréhension commune de ce qui doit être conçu. Ceci doit permettre d'améliorer la communication entre les différentes parties prenantes du processus d'ingénierie système. Par exemple, cela peut s'appliquer dans un contexte d'ingénierie concurrente où les travaux sont distribués sur plusieurs équipes, ou encore entre les acteurs du processus de conception, de l'identification des exigences à la définition/mise en œuvre des solutions. Dans [Zhang et al., 2003, Lau et al., 2009], les ontologies sont utilisées dans un processus de con-

figuration de produits. On rencontre également leur emploi pour l'expression de préférences dans [Cao et al., 2011].

Les ontologies en conception sont souvent orientées « taxonomie », c'est-à-dire qu'un cadre est fourni par une hiérarchie de concepts avec, au mieux, la sémantique de chaque concept. Dans [Furtado et al., 2001] [Wriggers et al., 2007], les auteurs ajoutent des règles reflétant les dépendances entre les propriétés d'un concept. D'autres comme [Simoff et Maher, 1998], [Yang et al., 2008] ou [Mao et al., 2010] intègrent des contraintes au sein des concepts permettant ainsi de comprendre les contraintes inhérentes au système à concevoir mais pas de guider leur utilisation.

Dans cette section, notre **problématique détaillée** est exprimée ainsi : dans le cadre de nos travaux, il est nécessaire de disposer d'un référentiel afin de formaliser des connaissances métier en conception de systèmes et en planification de projets grâce à des concepts, des variables, leurs domaines et des contraintes sur ces variables dans le but de :

- fournir un cadre facilitant l'expression des exigences système et des solutions au sein des alternatives système,
- fournir un cadre à la définition des tâches dans une structure de projet avec des concepts adaptés ainsi que leurs variables, domaines et contraintes.

Ainsi, nous abordons les propositions faites au regard de cette problématique détaillée de formalisation et d'exploitation de connaissances métier dans la section 4.2.2.

4.2.2 Développements

Les développements ont été réalisés dans le cadre de la thèse de Joël Abeille (PhD.2) et du projet ANR ATLAS.

A) Formalisation des connaissances métier

Dans nos travaux, nous avons proposé une ontologie dont les concepts sont hiérarchisés selon une loi de type généralisation/spécialisation sans héritage multiple. L'ontologie est représentée à l'aide d'une arborescence dont la racine est le concept *Universel* le plus général et les feuilles sont les concepts les plus spécialisés. Chaque concept est caractérisé par :

- un ou plusieurs modèles de variables. Les modèles seront réutilisés, par recopie, afin de caractériser chacune des entités,
- un ou plusieurs modèles de domaines, propre à chaque variable et décrivant le domaine admissible (par exemple : \mathbb{R} , \mathbb{N} , {Bleu, Rouge, Blanc}, etc.),
- un ou plusieurs modèles de contraintes afin de capitaliser des connaissances particulières à un concept donné. Chaque modèle de contrainte lie un ou plusieurs modèles de variables.

Ainsi, un concept C_k est caractérisé, outre son nom et sa sémantique propre, par un modèle de problème de satisfaction de contraintes [Montanari, 1974], c'est-à-dire par le triplet $(V_{C_k}, D_{C_k}, \Sigma_{C_k})$ avec :

- V_{C_k} : l'ensemble des modèles de variables du concept C_k ,
- D_{C_k} : l'ensemble des modèles de domaines du concept C_k ,
- Σ_{C_k} : l'ensemble des modèles de contraintes du concept C_k .

Un modèle de contrainte permet de préciser les valeurs autorisées ou interdites, les associations de valeurs possibles, des règles logiques, des formules mathématiques impliquant des modèles de vari-

ables. Les modèles de domaine précisent les domaines de définitions des modèles de variables, ceux ci pouvant être continus, discrets, temporels, etc.

Au sein de l'ontologie, si un concept C_{fils} a pour concept père C_{pere} , alors le concept C_{fils} hérite du concept C_{pere} l'ensemble des modèles de variables, l'ensemble des modèles de domaines et l'ensemble des modèles de contraintes. En outre, le concept C_{fils} possède ses propres modèles de variables, domaines et contraintes qui le spécialisent.

Dans notre application au couplage de la conception système avec la planification de projets, l'ontologie comporte des concepts propres aux systèmes à concevoir mais également des concepts propres aux projets et à leurs tâches. La création d'un système, d'un projet ou d'une tâche au sein d'un projet va être guidée par le concept approprié dans l'ontologie. Nous donnons un exemple d'ontologie utilisée pour illustrer les travaux de la thèse de Joël abeille [Abeille, 2011] (PhD.2).

- Universel ($\emptyset, \emptyset, \emptyset$)
- Système (
 - . $V_{Systeme} = \{Cout(C), Masse(M), Risque(R)\}$;
 - . $D_{Systeme} = \{DC : [0, +\infty[, DM : [0, +\infty[, DR : [0, 1]\}$;
 - . $\Sigma_{Systeme} = \{\emptyset\}$
- Longeron (
 - . $V_{Longeron} = \{C, M, R, Longueur(Lo), Section(S)\}$;
 - . $D_{Longeron} = \{DC : [0, +\infty[, DM : [0, +\infty[, DR : [0, 1], DLo : [0, +\infty[, DS : \{U, I, T\}\}$;
 - . $\Sigma_{Longeron} = \{\emptyset\}$
- Longeron_U (
 - . $V_{Longeron_U} = \{C, M, R, Lo, S\}$;
 - . $D_{Longeron_U} = \{DC : [0, +\infty[, DM : [0, +\infty[, DR : [0, 1], DLo : [0, +\infty[, DS : \{U, I, T\}\}$;
 - . $\Sigma_{Longeron_U} = \{S = U\}$
- Projet (
 - . $V_{Projet} = \{Duree(Du), Debut(Dd), Fin(Dt), Type ressources(Type_Ress),$
 $Quantite ressources(Qte_Ress), Cout(C), Risque(Risk)\}$;
 - . $D_{Projet} = \{DDu : [0, +\infty[, DDd : [0, +\infty[, DDt : [0, +\infty[, DType_Ress : \{Inge_Calcul,$
 $Inge_Structure, Inge_Elec\}, DQte_Ress : [0, +\infty[, DC : [0, +\infty[, DRisk : [0, 1]\}$;
 - . $\Sigma_{Projet} = \{Dt \leq Du + Dd\}$
- Tâche (
 - . $V_{Tache} = \{Duree(Du), Debut(Dd), Fin(Dt), Type ressources(Type_Ress),$
 $Quantite ressources(Qte_Ress), Cout(C), Risque(Risk)\}$;
 - . $D_{Tache} = \{DDu : [0, +\infty[, DDd : [0, +\infty[, DDt : [0, +\infty[, DType_Ress : \{Inge_Calcul,$
 $Inge_Structure, Inge_Elec\}, DQte_Ress : [0, +\infty[, DC : [0, +\infty[, DRisk : [0, 1]\}$;
 - . $\Sigma_{Tache} \{Dt \leq Du + Dd\}$

Dans nos travaux, nous considérons que le travail de construction, mise à jour et maintien de l'ontologie est dédié à la fonction de gestion des connaissances dans l'entreprise et doit être réalisé par des experts métiers. Nous n'abordons pas cet aspect dans nos travaux.

B) Exploitation des connaissances métier

L'ontologie proposée permet :

- d'associer un concept à chaque système à concevoir afin de le caractériser à un niveau conceptuel (concept), ainsi qu'à un niveau détaillé (variables),
- d'associer un concept à chaque alternative système (ou solution) afin de la caractériser et ainsi faciliter sa formalisation en précisant les variables à renseigner,
- d'associer un concept à chaque projet afin de le caractériser et ainsi faciliter sa définition en

précisant les variables à renseigner,

- d'associer un concept à chaque tâche afin de la caractériser et ainsi faciliter sa définition en précisant les variables à renseigner de même que sa planification au sein du projet.

Ainsi, suite à la réalisation de l'activité de *Définition du système*, le concepteur doit choisir un concept CS (Concept Système) qu'il associe aux informations sur le système à concevoir. Dès lors, l'ensemble des modèles de variables, domaines et contraintes inhérents au concept sont copiés dans les exigences système. Cela permet au concepteur de connaître les caractéristiques essentielles du système pour lequel il doit recenser les exigences. Ces exigences sont formalisées à l'aide des contraintes issues du concept, d'autres pouvant ensuite être rajoutées pour correspondre aux besoins exprimés par les différentes parties prenantes. Une illustration d'exigences systèmes construites à partir d'un concept de l'ontologie est donnée sur la figure 4.1.

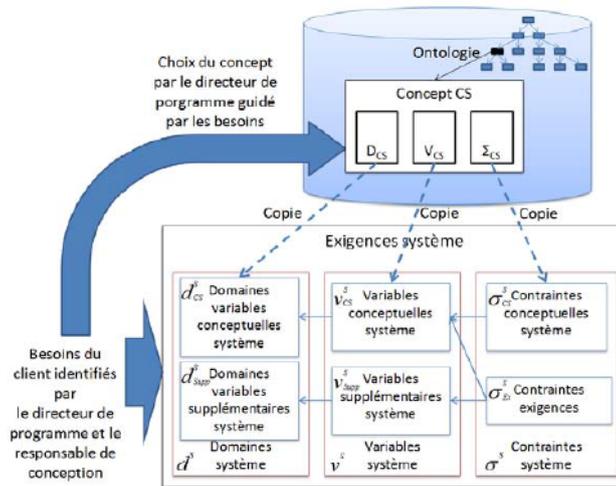


FIGURE 4.1 – Exemple d'exigences système construites à partir d'un concept CS de l'ontologie [Abeille, 2011]

Lorsque les exigences systèmes ont été formalisées, le choix de développement d'alternatives systèmes est mené de la même manière en choisissant, pour chaque alternative A_i envisagée, un concept CA_i qui soit un descendant du concept CS dans l'ontologie, ou bien le concept CS lui-même. Ceci permet au concepteur d'être guidé dans l'élaboration des solutions, les variables à renseigner, leurs domaines ainsi que les contraintes à respecter étant connues. Une illustration d'alternative système construite à partir d'un concept CA (descendant de CS dans l'ontologie) est donnée sur la figure 4.2.

L'élaboration des projets associés aux systèmes est réalisée en suivant la même démarche : le concept adéquat est choisi dans l'ontologie et la connaissance qu'il contient est utilisée pour bâtir l'entité correspondante (un projet ou une tâche). Cette démarche d'ingénierie guidée par les connaissances de l'ontologie a également été développée dans le logiciel ATLAS. Le diagramme de classes correspondant à l'ontologie et aux informations de conception et de planification de projet est illustré sur la figure 4.3 (la classe *Concept* est dupliquée sur la figure).

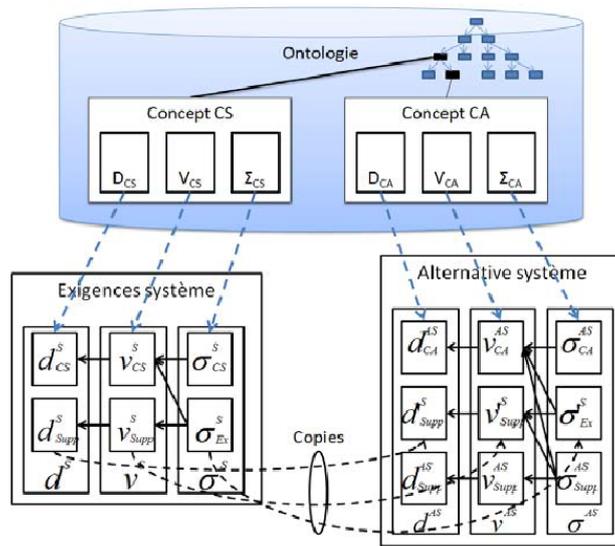


FIGURE 4.2 – Exemple d'alternative système construite à partir d'un concept CA de l'ontologie [Abeille, 2011]

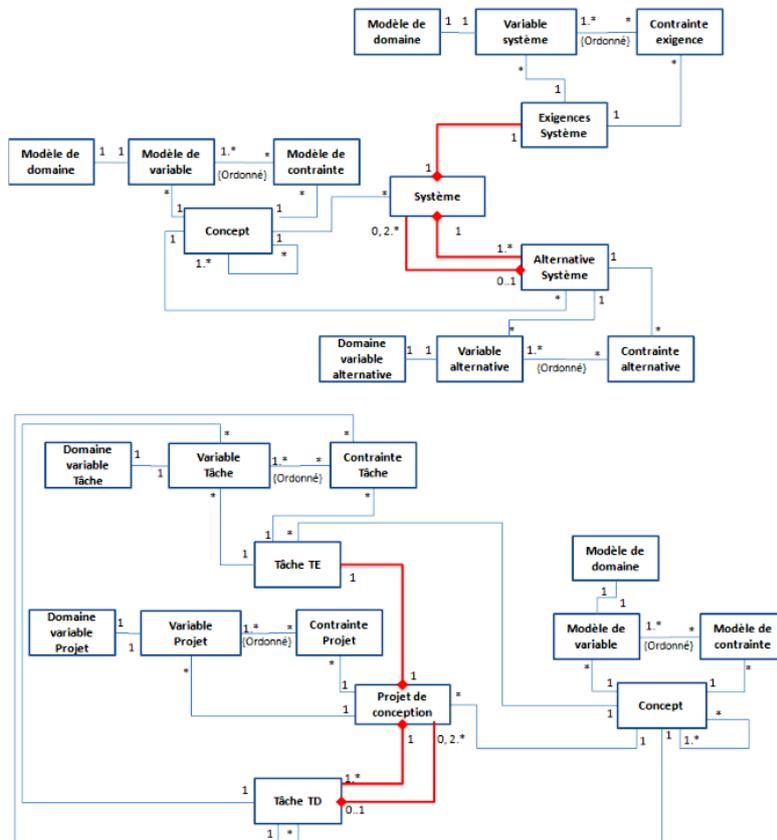


FIGURE 4.3 – Diagramme de classes correspondant aux concepts de l'ontologie et aux entités de projets et de systèmes [Abeille, 2011]

4.2.3 Bilan Partiel des travaux sur la formalisation/exploitation de connaissances métier

La démarche que nous avons développée pour formaliser et exploiter la connaissance métier est basée sur une ontologie de concepts (systèmes, projets, tâches). Chaque concept, défini, mis à jour et maintenu par un expert métier, est caractérisé par un modèle de problème de satisfaction de contraintes, c'est-à-dire des modèles de variables, domaines et contraintes. Ceci permet ensuite d'exploiter cette connaissance lors de la réalisation d'activités du processus d'ingénierie système ou d'autres processus. Le choix par un décideur d'un concept dans l'ontologie fournit un guide immédiat et opérationnel permettant de favoriser l'élaboration des entités nécessaires. Dans notre application au processus de conception de systèmes couplé au processus de planification d'un projet de conception, les concepts permettent de bâtir les projets et les tâches nécessaires et servent de guide métier pour caractériser les exigences systèmes puis les solutions devant les satisfaire.

Cette démarche permet de standardiser les informations sur les entités créées qui s'avèrent ensuite être plus facilement manipulables et surtout, réutilisables. Cette propriété revêt un caractère très important lorsqu'il s'agit de réutiliser des acquis non plus sous forme d'une connaissance explicite dans une ontologie comme ici, mais sous forme d'une connaissance « embarquée » au sein d'expériences de conception ou, plus généralement, d'ingénierie système. L'exploitation de cette forme de connaissance est détaillée dans la section 4.3 suivante.

Les travaux liés à cette problématique ont mené aux contributions suivantes :

Contribution 4.1 : La formalisation d'une ontologie de concepts afin de capitaliser les connaissances métier dans l'entreprise. Chaque concept, dont la sémantique est claire et non-ambiguë, est organisé hiérarchiquement dans l'ontologie. Il embarque sa part de connaissances sur l'entité qu'il modélise à l'aide d'un problème de satisfaction de contraintes décrivant les caractéristiques autorisées ou interdites.

Contribution 4.2 : La formalisation d'une démarche d'exploitation des connaissances métiers en conception de système et planification de projets. L'utilisation des concepts permet d'extraire des guides lors de l'élaboration d'entités projets ou systèmes. La démarche a été utilisée pour la conception de systèmes (caractérisation des exigences systèmes et des solutions) et la planification de projets (projets, tâches). Les principes sont implémentés dans la plate-forme logicielle ATLAS.

Encadrement : Ce travail a été abordé dans un chapitre de la **thèse de Joël Abeille** [Abeille, 2011] (PhD.2) et constitue un volet du projet ANR ATLAS.

Projet : Ce travail était adossé au projet ANR ATLAS auquel il a contribué.

Publications : Ce travail a été abordé dans [Romero et al., 2014] (A.1), [Abeille et al., 2010] (B.10), [Coudert et al., 2011a] (B.8) et [Vareilles et al., 2012b] (B.6).

Nous décrivons dans la section suivante les travaux réalisés sur l'exploitation d'expériences guidées par les connaissances métier.

4.3 L'exploitation d'expériences guidée par les connaissances

4.3.1 Problématique détaillée de la réutilisation d'expériences

Nous avons exposé dans le chapitre 1 la problématique générale de l'aide à la décision par retour d'expérience. Nous rappelons ce contexte global. Il s'agit d'exploiter des expériences passées afin d'en extraire des éléments de connaissances pour aider à résoudre de nouveaux problèmes. Les méthodes employées sont basées sur le principe du Raisonnement à Partir de Cas qui correspond à l'enchaînement d'activités qui mènent à la résolution du problème [Kolodner, 1993, Aamodt and Plaza, 1994, Finnie and Sun, 2003]. Un nouveau problème à résoudre (appelé cas cible), une fois caractérisé (activité de *définition du problème*), est confronté à une base d'expériences (cas cibles) où les expériences les plus similaires au problème sont identifiées (activité de *recherche*). Parmi celles-ci, une sélection est réalisée et un cas cible est adapté afin de correspondre exactement au nouveau cas source (activité d'*adaptation* ou de *réutilisation*) puis révisé (activité de *textitrévision*) et finalement capitalisé (activité de *réention*) dans la base d'expériences.

Les outils que nous avons développés doivent permettre de fournir une aide à la décision au cours de la réalisation du processus d'ingénierie système (et des processus couplés ou aidants) en se basant sur des expériences, tout en étant guidé par des connaissances métier. Il est tout d'abord nécessaire de guider l'outil de RàPC par la connaissance métier. La formalisation d'un problème doit pouvoir être réalisée avec une sémantique claire et non-ambiguë et être basée sur une modélisation conceptuelle structurée [Kamsu-Foguem et al., 2008] (A.4). Ainsi, les éléments de constructions des expériences doivent être capitalisés dans une ontologie afin de faciliter à la fois la formalisation de nouvelles expériences [Darlington and Culley, 2008], leur future recherche et leur réutilisation. Les objectifs de l'utilisation des ontologies en RàPC sont :

- d'être en mesure de capturer, comprendre et utiliser les concepts du domaine lors de la construction des expériences, c'est-à-dire des modèles de connaissances contextualisées détenues par les acteurs des processus lorsqu'ils réalisent leurs tâches ;
- d'aider à la formalisation de nouveaux problèmes autant de manière globale et conceptuelle que détaillée et opérationnelle.

Ensuite, lors de l'occurrence d'un problème que l'outil de RàPC doit être en mesure de nous aider à résoudre, la représentation du problème peut être incomplète, incertaine, imprécise [Dubois et al., 1998, Nanda et al., 2007, Chang et al., 2008] ou encore sujette à préférences [Junker and Mailharro, 2003], [Benferhat et al., 2006, Domshlak et al., 2011]. Notre outil doit être mis en œuvre au plus tôt dans un processus lorsque le problème à résoudre peut ne pas être encore parfaitement défini. Or, dans certains domaines comme la conception de produits ou de systèmes, les approches de RàPC existantes (voir par exemple un large panorama dans [Maher and Gomez de Silva Garza, 1997, Goel and Craw, 2006, Saridakis and Dentsoras, 2007]) partent de l'hypothèse que les besoins sont parfaitement formalisés à l'aide de couples attribut-valeur mais cette situation est assez peu réaliste dans de nombreux cas [Xuanyuan et al., 2011]. En effet, la formalisation des besoins peut être incomplète durant la phase de formalisation des exigences et affinée lorsque les connaissances du concepteur sur le système à concevoir s'améliorent [Gomez de Silva-Garza and Maher, 1996]. De plus, le décideur peut souhaiter intégrer ses préférences dans la formalisation d'un problème afin d'orienter la recherche de cas ou bien raisonner à un niveau conceptuel plutôt que détaillé. Face à ce constat, des approches de type « RàPC flous » apportent cependant des solutions en exploitant les concepts de la logique floue pour modéliser les incertitudes ou les préférences sur les valeurs d'attributs requises (voir [Dubois et al., 1998,

Ruet and Geneste, 2002, Sun et al., 2008, Wu et al., 2008] [Zarandi et al., 2011]).

Enfin, les approches de RàPC sont généralement basées sur l'hypothèse que des mesures de similarités entre valeurs possibles d'une caractéristique de problème, d'un attribut ou d'un objet sont soit connues, soit facilement calculables. Partant de ces mesures *locales*, des mécanismes d'agrégation permettent de calculer des similarités globales entre un problème et des solutions (voir [Bergmann, 2002, Béler, 2008]). Cependant, dans un contexte industriel, la nature subjective de ces similarités les rend difficilement évaluables par un expert [Sun et al., 2008], notamment lorsqu'il s'agit de valeurs symboliques. Ici encore, l'utilisation de mesures de similarités floues peut apporter des solutions (voir par exemple [Wang, 1997, Liu, 2005] [Avramenko and Kraslawski, 2006, Negny and Le Lann, 2008, Negny et al., 2010]).

Notre **problématique détaillée** est exprimée de la manière suivante : il s'agit de proposer une approche permettant de favoriser l'exploitation de connaissances métier pour guider un processus de Raisonnement à Partir de Cas en vue de l'aide aux processus autour de l'ingénierie système. L'approche doit être intégrée et l'activité de recherche de cas similaires doit pouvoir être mise en œuvre lorsque l'on manque de mesures de similarités ou que l'utilisateur souhaite exprimer ses préférences.

Nous voyons que ces éléments de problématique concernent principalement les deux premières activités du RàPC : la définition du problème et la recherche de cas similaires. Bien que souvent considéré comme un problème clé [Policastro et al., 2008], nous n'abordons pas l'activité d'adaptation dans nos travaux. En revanche, cette problématique a été abordée dans des travaux réalisés au LGP [Ruet and Geneste, 2002]. Dans nos travaux, nous avons abordé le retour d'expérience selon deux axes définis par les applications : l'aide à la résolution de problèmes et l'aide à la conception de systèmes. Les modèles que nous proposons doivent donc être parfaitement intégrés aux processus existants. Les développements réalisés selon ces deux axes sont présentés dans la section 4.3.2.

4.3.2 Développements

4.3.2.1 Le retour d'expérience en résolution de problèmes

Nous avons vu dans le chapitre 1 que, dans les travaux menés au LGP, le retour d'expérience était réalisé au sein d'un processus de résolution de problèmes, ce dernier servant de cadre méthodologique (voir section 1.4.1.3). Ainsi, une expérience est formalisée à l'aide d'un événement de type « problème », du contexte dans lequel cet événement a eu lieu, des analyses menées pour identifier et comprendre ses causes racines et enfin, des solutions mises en œuvre pour limiter la propagation des effets et éviter qu'il ne se reproduise.

Le premier modèle que nous avons proposé dans [Kamsu-Foguem et al., 2008] (A.4) est basé sur l'exploitation du formalisme des graphes conceptuels [Sowa, 1984]. Il s'agit d'un outil qui exploite connaissances et expériences dans une logique de réutilisation de cas. **Le processus général**, intégré à un processus de résolution de problème (donc une aide à l'ingénierie système) est représenté sur la figure 4.4.

La représentation du domaine (activité 1) est l'activité qui permet de construire l'ontologie formelle à l'aide d'un treillis de concepts et de relations [Sowa, 1976, Mugnier and Chein, 1998]. La seconde activité représente la capitalisation d'événements et de contextes : elle consiste, pour l'acteur opérationnel, à exploiter l'ontologie afin de représenter les événements ainsi que leur contexte. Ensuite, l'analyse du problème doit être réalisée par des experts et des solutions proposées (activité 3). Cette activité doit être aidée par les expériences précédemment capitalisées. Enfin, la généralisation (activité

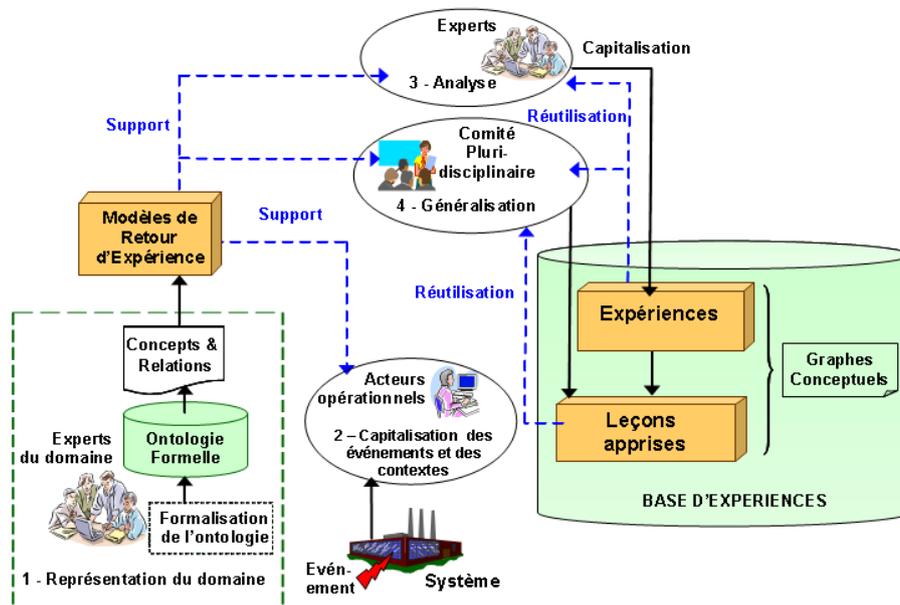


FIGURE 4.4 – Processus de retour d’expérience basé sur une ontologie et les graphes conceptuels [Kamsu-Foguem et al., 2008]

4) consiste en la construction, par un comité pluridisciplinaire, de connaissances, de leçons ou de règles à partir des expériences déjà capitalisées mais également des leçons préalablement apprises.

L’**ontologie utilisée** est formée d’un Treillis de types de Concepts (TC) et d’un Treillis de types de Relations (TR) qui formalisent la connaissance métier. TC est l’ensemble fini de tous les types de concepts utilisables et TR décrit les types de relations. TC et TR sont structurés dans une hiérarchie (voir l’ontologie spécifique au retour d’expérience sur la figure 4.5). A partir de TC et TR , il est possible de construire le *support* S , c’est-à-dire l’ontologie vue au travers des graphes conceptuels. Il est défini par le quadruplet $S = (TC, TR, I, t)$. I est l’ensemble des *marqueurs individuels* qui permettent de définir des concepts à partir des types de concepts au sein des graphes conceptuels. Par exemple, le type de concept « Machine » peut être marqué par le marqueur individuel « M1 ». Le concept ainsi obtenu est alors noté [Machine : M1] où le texte « Machine : M1 » est appelé *label*. t est une application de I dans TC . Cette ontologie permet de guider la construction des expériences.

Nous avons défini le **modèle générique d’une expérience** à l’aide d’un Graphe Conceptuel (GC). Un graphe conceptuel simple est un graphe fini, dirigé et biparti constitué de nœuds concept (les rectangles) connectés à des nœuds relation (les cercles), concepts et relations provenant de l’ontologie. Afin de compléter le formalisme, la notion de graphes conceptuels imbriqués a été introduite dans [Chein, 1998]. Ainsi, une description interne partielle peut être associée à chaque nœud concept (dans le rectangle *Description*). Basé sur ce formalisme, le modèle d’une expérience par graphes conceptuels est donné sur la figure 4.5. Le marqueur * est le marqueur générique. Dès l’occurrence d’un nouvel événement (un problème), ce graphe générique est instancié afin de bâtir une nouvelle expérience et la capitaliser. Le GC de la figure 4.5 se lit ainsi : « Une expérience est décrite par un événement qui appartient à un contexte et nécessite une analyse qui génère une solution ». L’événement, le contexte, l’analyse et la solution peuvent être décrits par des GC imbriqués.

Dans notre approche, l’activité de construction d’une expérience est aidée par la **recherche d’ex-**

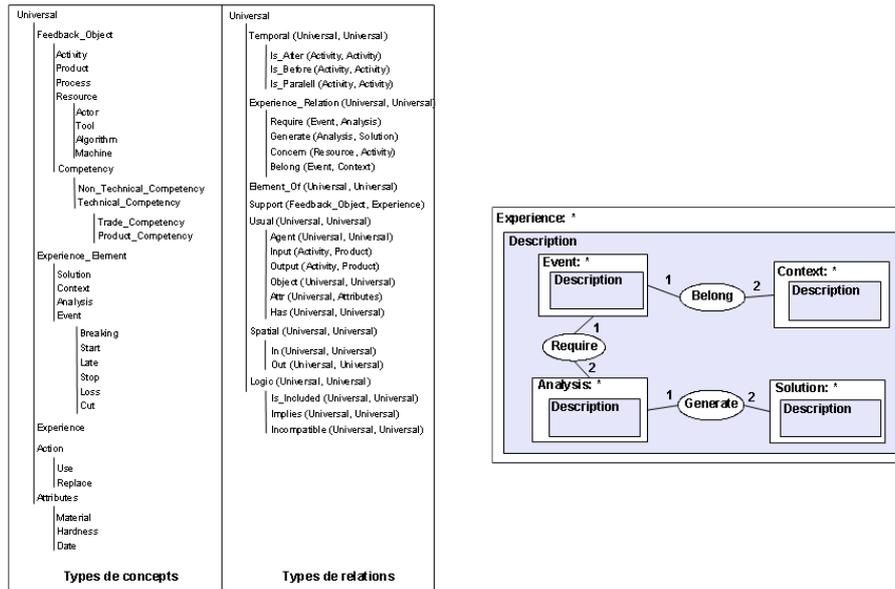


FIGURE 4.5 – Ontologie (types de concepts et de relations) et graphe conceptuel représentant une expérience générique

expériences similaires pouvant être réutilisées. Pour cela, l'opérateur de **projection** des graphes conceptuels est utilisé. Cet opérateur permet d'identifier des expériences passées réutilisables. Il permet l'extraction d'un (ou de) sous-graphe(s) à partir d'un graphe donné en appliquant une séquence de règles de spécialisation. Plus formellement, la projection π d'un graphe $G1$ sur un graphe $G2$ est définie par :

- π est une application des nœuds de $G1$ sur les nœuds de $G2$ qui préserve les arcs, c'est-à-dire que si xy est un arc dans $G1$ alors $\pi(x)\pi(y)$ est un arc dans $G2$;
- π peut spécialiser les labels des nœuds concepts et relation. Pour chaque concept c de $G1$, $\pi(c)$ est un concept de $\pi(G1)$ tel que $type(\pi(c)) \leq type(c)$ et si c est un concept individuel alors $marqueur(\pi(c)) = marqueur(c)$.

L'expression $c_i \leq c_j$ signifie que soit c_i est une spécialisation de c_j , soit ils sont identiques.

Ainsi, dès l'apparition d'un nouvel événement, une nouvelle expérience est instanciée. L'événement et son contexte doivent être décrits en réutilisant éventuellement des GC types correspondant au domaine. Dans l'exemple de la figure 4.6, les GC a) et b) correspondent à la description d'un événement et de son contexte dans le domaine de l'usinage. Afin d'identifier des expériences similaires dans la base d'expériences, un GC requête (figure 4.6, c)) est construit puis projeté sur l'ensemble des expériences de la base. Dans notre exemple, la requête peut se traduire par « *Existe-t-il une expérience dont la description de l'événement correspond à un bris d'outil ?* » L'identification des expériences proches permettra éventuellement la réutilisation, totale ou partielle, des analyses et/ou des solutions. Le résultat de la projection (figure 4.6, d)) montre que l'expérience *Exp1* correspond. L'outil trouvé (outil de fraisage) n'est pas celui du nouvel événement (outil de tournage) mais il est probable que l'analyse *A1* dans *Exp1* pourra être utile et, le cas échéant, être réutilisée par adaptation.

La figure 4.7 illustre l'expérience source *Exp1* identifiée dans la base d'expériences grâce à la mise en œuvre de l'opérateur de projection des GC et l'expérience *Exp025*, obtenue par adaptation par l'expert de l'analyse et de la solution de *Exp1*.

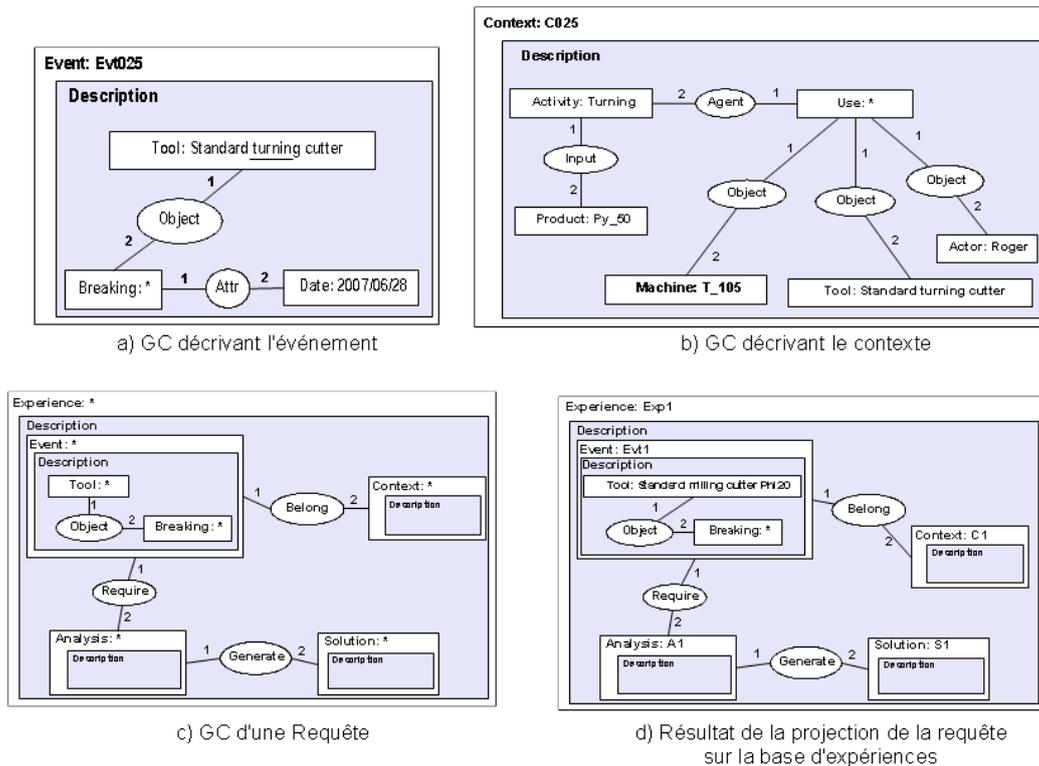


FIGURE 4.6 – Exemple de Graphes Conceptuels modélisant un événement (a), son contexte (b), une requête (c) et le résultat de la projection de la requête sur la base d'expériences (d)

Nous voyons que l'avantage de la méthode est de ne pas nécessiter l'utilisation de mesures de similarités. De plus, bien que la requête soit partiellement définie et peu précise, il est possible d'identifier des expériences similaires. L'expression de préférences par le décideur est facilitée par les graphes conceptuels qui s'avèrent aisément manipulables et compréhensibles par un ingénieur expert. La représentation graphique et la correspondance avec le langage naturel favorisent l'expression et la compréhension des expériences. De plus, tous les éléments d'interrogation et de construction d'une nouvelle expérience sont parfaitement formalisés au sein de l'ontologie. Celle-ci permet, outre les éléments « métier » liés au domaine d'application, de formaliser également les concepts et relations propres au retour d'expérience (expériences, événements, analyses, solutions, etc.).

Nous avons développé un outil permettant de valider notre approche. Développé en langage C++ au laboratoire LERIA d'Angers, cet outil est basé sur la bibliothèque *Cogitant* [Genest and Salvat, 1998]. L'ensemble des GC exemples illustrés dans cette section en sont issus.

Ces travaux, publiés dans [Coudert and Kamsu-Foguem, 2008] (C.7), [Kamsu-Foguem et al., 2008] (A.4) ont permis de proposer une approche conceptuelle basée entièrement sur une ontologie. Ces bases ont ensuite permis de faire des propositions en conception de systèmes.

4.3.2.2 Le retour d'expérience en conception de système

La seconde application de réutilisation d'expériences guidée par les connaissances concerne la conception de systèmes. L'approche demeure assez similaire à la précédente dans le sens où elle est orientée vers la réutilisation de cas et utilise des éléments de connaissance métier de type *concepts*

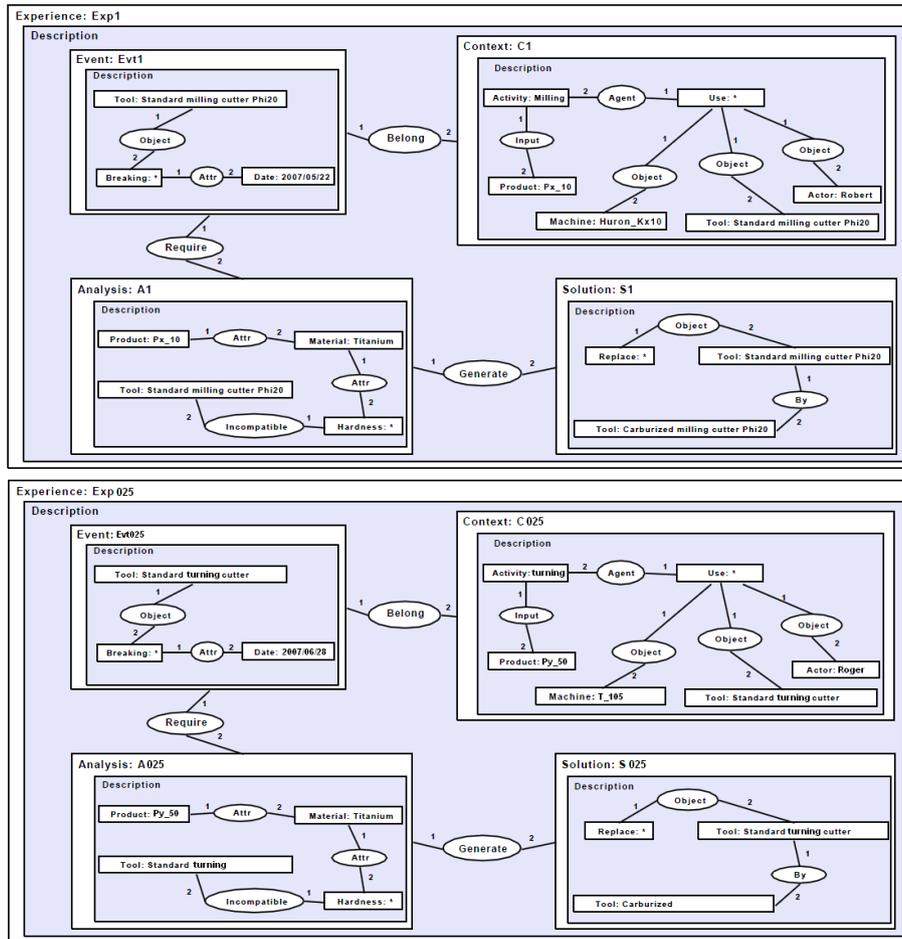


FIGURE 4.7 – Exemple d'expérience adaptée (Exp025) d'une expérience identifiée par projection dans la base d'expériences (Exp1)

capitalisés dans une ontologie. L'ontologie utilisée est celle décrite dans la section 4.2. L'approche que nous proposons est intégrée au processus d'ingénierie système. Ce travail, abordé dans l'un des chapitres de la thèse de Joël Abeille [Abeille, 2011] (PhD.2), constitue également une proposition faite dans le cadre du projet ANR ATLAS et a été ensuite développé dans l'article [Romero et al., 2014] (A.1).

Le principe développé dans l'approche est de permettre au décideur :

- d'exprimer son « problème de conception » en intégrant ses préférences sur les exigences systèmes exprimées à l'aide de contraintes,
- de raisonner à un niveau conceptuel si la formalisation des besoins, en phase amont de conception préliminaire, est incomplète,
- d'être en mesure d'identifier des expériences passées compatibles avec les nouvelles exigences sans avoir à utiliser de mesures de similarités entre caractéristiques,
- d'élargir le champs de la recherche, permettant ainsi d'identifier des solutions qui ne satisfont pas totalement les exigences systèmes mais qui le pourront suite à la réalisation de la tâche d'adaptation.

Le processus intégré conception de système / RàPC est illustré sur la figure 4.8. Ce processus est

récuratif. En cas de décomposition d'un système à concevoir en sous-systèmes, le processus est mis en œuvre pour chaque sous-système.

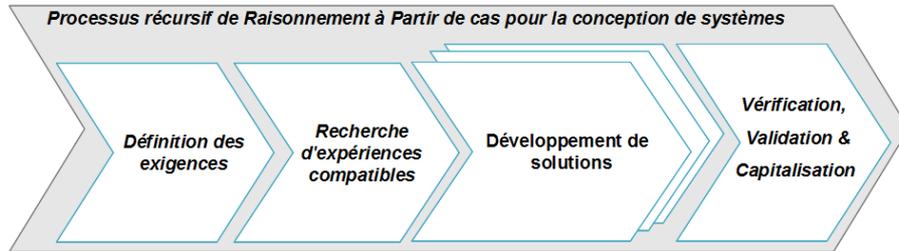


FIGURE 4.8 – Processus de conception de systèmes intégré au processus de Raisonnement à Partir de Cas

Le modèle pris en compte pour modéliser problème de conception et solutions est celui de la figure 4.3. Formellement, nous définissons un système $S = (ES, SOL)$ par ses exigences système ES et un ensemble de p solutions $SOL = \{Sol_1, Sol_2, \dots, Sol_p\}$.

Modèle des exigences systèmes : les exigences système ES d'un système S à développer sont caractérisées par un Concept Système (CS) et un problème de satisfaction de contraintes (PSC_S). PSC_S est défini par un ensemble de variables V_S , un ensemble de domaines de variables (DV_S) et un ensemble de contraintes impliquant des variables (σ_S) tel que $PSC_S = (V_S, DV_S, \sigma_S)$.

Modèle d'une solution : une solution Sol_i est caractérisée par un concept SoC_i tel que $SoC_i = Concept(Sol_i)$, un ensemble de variables (V_{Sol_i}), un ensemble de domaines (DV_{Sol_i}) et un ensemble de valeurs de variables ($V_{Sol_i}^{value}$). Les concepts CS et SoC_i sont issus de l'ontologie et sont tels que $SoC_i \leq CS$, c'est-à-dire, soit SoC_i est un descendant de CS dans l'ontologie, soit ils sont identiques.

La définition des exigences système : la définition des exigences système permet de définir les éléments CS et PSC_S . Afin de prendre en compte les préférences du concepteur et rendre l'approche plus flexible, deux tâches sont réalisées par le concepteur :

- la définition d'un ensemble de concepts compatibles et/ou préférés par rapport à CS ,
- le relâchement de contraintes de l'ensemble σ_S .

Pour cela, la théorie des ensembles flous est utilisée afin de définir les informations suivantes :

- C_c : l'ensemble flou des concepts compatibles,
- μ_{C_c} : la fonction d'appartenance des concepts de l'ontologie à l'ensemble C_c . $\mu_{C_c}(c)$ indique dans quelle mesure le concept c est préféré par le décideur pour effectuer la recherche de cas compatibles. Cette mesure de préférence peut être guidée par l'évaluation de la *similarité conceptuelle* entre le concept requis CS et le concept préféré c . Cette similarité est évaluée dans nos travaux en utilisant la mesure de Wu et Palmer [Wu and Palmer, 1994]. Cette mesure est basée sur la distance entre les concepts et leur position relative par rapport au concept *Universal* (la racine) dans l'ontologie et non sur une mesure de similarité fournie par un expert. Un panorama de telles mesures conceptuelles est donné dans [Cordì et al., 2005, Batet et al., 2011]),
- μ_{σ_S} : l'ensemble des fonctions d'appartenance relatives à l'ensemble des contraintes σ_S correspondant aux exigences système tel que $\mu_{\sigma_S} = \{\mu_{\sigma_i}\}$. μ_{σ_i} est la fonction d'appartenance de la contrainte σ_i . Elle caractérise l'ensemble flou des valeurs de variables compatibles (ou des tuples compatibles) au regard de la contrainte σ_i . Cette compatibilité est directement exprimée selon les

préférences du concepteur sur une échelle allant de 0 à 1. Ainsi rendue flexible, cette contrainte est notée $\tilde{\sigma}_i$,

- $\tilde{\sigma}_S$: l'ensemble de M contraintes flexibles tel que contrainte $\tilde{\sigma}_S = \{\tilde{\sigma}_1, \tilde{\sigma}_2, \dots, \tilde{\sigma}_M\}$.

La formalisation détaillée de ces ensembles est décrite dans [Romero et al., 2014] (A.1). En guise d'illustration, des exemples d'ensembles flous μ_{C_c} et μ_{σ_i} sont proposés sur la figure 4.9. Le concept système CS (« Aileron ») est totalement compatible ($\mu_{C_c}(Aileron) = 1$). Ses descendants dans l'ontologie ont une similarité conceptuelle de 0.8 (calculée à partir de la mesure de Wu et Palmer) qui est utilisée pour définir leur degré d'appartenance à l'ensemble des concepts compatibles. Le concept « Single Slotted flap » est ajouté avec une préférence de 0.3 par le concepteur. Les ensembles flous correspondant à deux exigences système, c'est-à-dire à deux contraintes σ_1 (contrainte continue) et σ_2 (contrainte discrète) sont également illustrés. Ainsi, la recherche de solutions compatibles peut être réalisée à partir de ces ensembles flous.

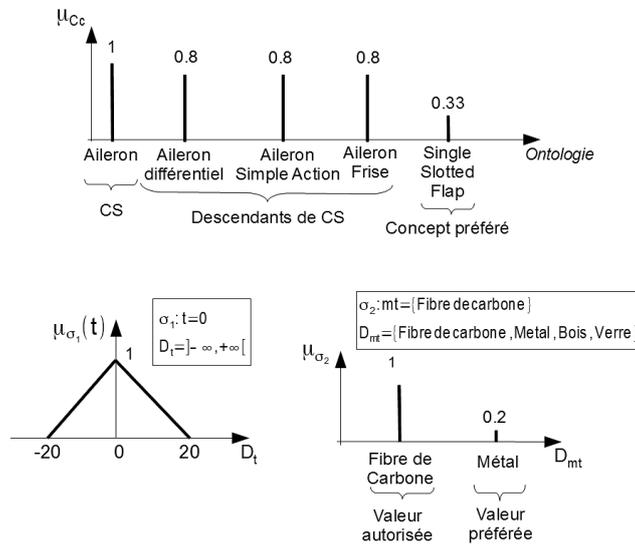


FIGURE 4.9 – Exemple d'ensembles flous pour les concepts et les contraintes

La recherche de cas compatibles : il s'agit, à partir des ensembles μ_{C_c} et μ_{σ_S} , de rechercher dans la base d'expériences des solutions compatibles avec les exigences système. Les degrés de liberté introduits sur le concept CS recherché et sur les contraintes σ_S à satisfaire permettent d'élargir les champs de recherche. Le processus de recherche que nous proposons fonctionne sur deux niveaux : un niveau conceptuel permettant une présélection de cas compatibles et un niveau détaillé permettant de rechercher, parmi les cas présélectionnés, ceux qui sont compatibles avec les exigences système :

- **la présélection de cas compatibles** permet de constituer l'ensemble PRE à partir de l'ensemble $SOL = \{Sol_1, Sol_2, \dots, Sol_p\}$ des solutions capitalisées dans la base d'expériences selon l'équation 4.1. L'utilisateur fixe un seuil α ($0 \leq \alpha \leq 1$) et seules les solutions de SOL dont la compatibilité du concept (noté $Concept(Sol_i)$) est supérieure ou égale au seuil sont conservées pour le niveau suivant,

$$PRE = \{Sol_i\} / \mu_{C_c}(Concept(Sol_i)) \geq \alpha \forall Sol_i \in SOL \quad (4.1)$$

- **l'évaluation de la compatibilité d'une solution par rapport aux exigences systèmes** consiste à évaluer dans quelle mesure une solution Sol_k ($Sol_k \in PRE$) satisfait $\tilde{\sigma}_S$ l'ensemble des contraintes flexibles. Ceci est réalisé en deux temps : i) le calcul des compatibilités locales de la solution au regard de chaque contrainte (équation 4.2) ; ii) l'agrégation des compatibilités locales afin d'obtenir la compatibilité globale (équation 4.3).

Pour le **calcul de compatibilité locale**, si les variables impliquées dans la contrainte sont toutes présentes dans la solution, la compatibilité est donnée par la valeur retournée par la fonction d'appartenance. Sinon, la compatibilité est nulle. Pour ce second cas de figure, nous avons également étudié dans [Coudert et al., 2012] (B.2) la possibilité d'utiliser la similarité conceptuelle afin d'avoir un résultat moins « pessimiste ».

$$Comp(Sol_k, \tilde{\sigma}_i) = \begin{cases} \mu_{\sigma_i}(V_{Sol_k}^{value}) & \text{si } V_{\sigma_i} \subseteq V_{Sol_k} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (4.2)$$

Pour le **calcul de compatibilité globale**, l'agrégation des M compatibilités locales (M est le nombre de contraintes de σ_S) est réalisé en utilisant l'opérateur *Generalized Ordered Weighted Averaging* (GOWA) proposé dans [Yager, 2004] (équation 4.3).

$$Comp(Sol_k, \tilde{\sigma}_S) = \left(\sum_{i=1}^M (1/M) * (Comp(Sol_k, \tilde{\sigma}_i))^{\beta} \right)^{1/\beta} \quad (4.3)$$

Le paramètre β permet de régler le fonctionnement [Merigó and Gil-lafuente, 2008] : si $\beta \rightarrow -\infty$, l'opérateur retourne le minimum, si $\beta \rightarrow +\infty$, il retourne le maximum, si $\beta = 2$, la moyenne quadratique est retournée, etc.

L'approche a été mise en œuvre dans le logiciel ATLAS. Cependant, les contraintes prises en compte ne sont que des contraintes unaires portant sur une variable continue. Afin de valider les travaux, une plate-forme de test a été développée en langage Ruby. La plate-forme permet de générer aléatoirement une ontologie et une base d'expériences et d'évaluer les performances. Les résultats ont été publiés dans [Romero et al., 2014] (A.1). Les paramètres de test sont la taille de l'ontologie (nombre de concepts fils pour un père) et profondeur (nombre d'arcs entre le concept universel le plus général et le concept le plus spécialisé). Nous avons également diverses bases d'expériences en variant le nombre de variables et de contraintes pour les exigences ainsi que le nombre de cas. Chaque cas cible est également généré aléatoirement. Les résultats sont synthétisés dans le tableau 4.1. Pour chaque test, dix expérimentations ont été réalisées et chaque triplet correspond aux valeurs minimum, moyenne et maximum obtenues. Le paramètre α est fixé à 0.5 et β à 2.

Ces résultats montrent que l'approche permet de réaliser la recherche en un temps « raisonnable » pour l'utilisateur, même pour des bases très grandes (2.10^5 solutions) car seuls les cas présélectionnés sont utilisés pour la recherche détaillée. Ceci a été vérifié en testant l'approche avec $\alpha = 0.0$ et 2.10^5 cas sources. Le temps de recherche obtenu est 33 fois plus grand que le pire des résultats obtenu dans la table 4.1.

4.3. L'exploitation d'expériences guidée par les connaissances

Profondeur Ontologie	6			15		
# de descendants par concept	0 / 4 / 8			0 / 1.5 / 3		
# de concepts	580/9000/2.10 ⁴	10 ³ /12.10 ³ /2.10 ⁴	2000/10 ⁴ /2.10 ⁴	3.10 ⁴ /76.10 ³ /10 ⁵	10 ⁴ /4.10 ⁴ /10 ⁵	6000/6.10 ⁴ /10 ⁵
# Solutions	2.10 ³	2.10 ⁴	2.10 ⁵	2.10 ³	2.10 ⁴	2.10 ⁵
# de variables de solution	3 / 16 / 30	2 / 17 / 32	1 / 16 / 33	6 / 34 / 56	4 / 33 / 60	1 / 34 / 61
# de variables d'exigence	7 / 13 / 18	11 / 15 / 20	12 / 16 / 20	22 / 32 / 40	18 / 28 / 35	23 / 32 / 38
# d'exigences système	4 / 8 / 10	6 / 8 / 10	6 / 8 / 10	12 / 17 / 19	13 / 16 / 19	13 / 16 / 18
# de solutions présélectionnées	13 / 88 / 377	118/540/2100	1250/4000/17500	1/20/64	67/500/2000	1000/4000/15.10 ³
Compatibilité	0.47 / 0.73 / 1.0	0.53 / 0.73 / 1.0	0.47 / 0.75 / 1.0	0.62 / 0.78 / 1.0	0.6 / 0.78 / 1.0	0.55 / 0.75 / 1.0
Temps de recherche (s)	0.009/0.02/0.04	0.1 / 0.2 / 0.4	0.9 / 2.4 / 12	0.02 / 0.04 / 0.15	0.2 / 0.45 / 1.3	2 / 7 / 15

TABLE 4.1 – Synthèse des résultats de la recherche d'expériences compatibles

4.3.3 Bilan Partiel des travaux sur la formalisation/exploitation d'expériences guidée par les connaissances métier

Nous avons abordé dans cette section nos travaux sur la réutilisation d'acquis guidée par les connaissances métier. Basées sur les principes du Raisonnement à Partir de Cas, nous avons proposé une approche permettant d'identifier des expériences compatibles avec un nouveau problème à résoudre. Le principe est de se baser sur des éléments de connaissances contenus dans une ontologie pour bâtir les expériences mais également pour identifier des expériences compatibles avec le nouveau problème. Nos propositions ont été développées pour la résolution de problèmes et la conception de systèmes. Les travaux liés à cette problématique ont mené aux contributions suivantes :

Contribution 4.3 : La formalisation d'un outil d'aide à la décision de type *réutilisation de cas* permettant d'exploiter des expériences passées pour résoudre un nouveau problème en se guidant à l'aide de connaissances métier capitalisées dans une ontologie.

Contribution 4.4 : La formalisation de deux approches qui permettent de formaliser un nouveau problème en modélisant les préférences du décideur, des incertitudes ou des incomplétudes sur le problème à résoudre ou de représenter le problème à un niveau aussi bien conceptuel que détaillé. Les graphes conceptuels et la logique floue ont été utilisés respectivement dans chacune de ces approches.

Contribution 4.5 : La formalisation d'outils de raisonnement permettant la recherche de cas compatibles dans une base d'expériences afin d'identifier ceux qui peuvent potentiellement être réutilisés et adaptés. Les approches développées permettent de raisonner si l'on ne dispose pas des informations sur les similarités entre caractéristiques de cas cibles et source. L'opérateur de projection des graphes conceptuel a été investigué dans le domaine de la résolution de problèmes. La logique floue et la mesure de similarité conceptuelle de Wu et Palmer [Wu and Palmer, 1994] a été utilisée dans le domaine de la conception de systèmes.

Contribution 4.6 : La formalisation de processus basés sur le RàPC et parfaitement intégrés à deux processus liés l'ingénierie système : le processus de résolution de problèmes et le processus de conception de systèmes.

Encadrement : Ce travail a été abordé dans un chapitre de la **thèse de Joël Abeille** [Abeille, 2011] (PhD.2), aidé des travaux de master recherche de Céline Boitte [Boitte, 2009] (M2R.3) et Juan Romero [Romero, 2010] (M2R.4).

Projet : Ces travaux ont contribué au projet ANR ATLAS.

Publications : Ces travaux ont été décrits dans [Kamsu-Foguem et al., 2008] (A.4) pour la contribution en résolution de problèmes et dans [Romero et al., 2014] (A.1) pour la contribution en conception de systèmes. Ce travail a été également décrit dans [Coudert and Kamsu-Foguem, 2008] (C.7), [Coudert et al., 2011b] (B.7), [Coudert et al., 2012] (B.2).

4.4 L'exploitation de connaissances guidée par les expériences

4.4.1 Problématique détaillée de la réutilisation de connaissances guidées par les expériences

Dans cette dernière section sur la réutilisation d'acquis, nous abordons le cas des connaissances contextuelles dont l'exploitation est guidée par les connaissances contenues au sein d'expériences. Notre problématique, qui contribue également aux trois niveaux *Processus, Outils, Expériences/ Connaissances*, s'attaque donc à la définition d'une approche permettant d'exploiter des connaissances contextuelles guidées par les expériences passées afin d'aider la réalisation des tâches dans un processus d'ingénierie système. Ces travaux constituent une partie du projet FUI Hélimaintenance et ont été abordés dans la thèse d'Aurélien Codet De Boisse [Codet De Boisse, 2013] (PhD.3), co-encadré avec le laboratoire CGI de l'Ecole des mines d'Albi.

Les connaissances que nous utilisons dans notre problématique sont des connaissances métier, c'est-à-dire propres à des domaines particuliers mais qui dépendent du contexte d'utilisation. Dans la littérature, les connaissances contextuelles sont définies comme non-nécessairement explicites et concernent le contexte dans lequel des événements peuvent se produire au sein d'activités humaines [Pantazi et al., 2004], [Brézillon, 2007], [Stefania Montani, 2011]. Les connaissances contextuelles sont, dans notre cas, des connaissances explicites, mais qui, pour pouvoir être exploitées, nécessitent d'être contextualisées, c'est-à-dire, adaptées, paramétrées ou précisées en fonction du contexte dans lequel on souhaite les mettre en œuvre. Nous les définissons donc comme des connaissances métier paramétrables selon le contexte d'exploitation. Elles sont utilisées conjointement avec des connaissances générales (exploitables dans un contexte plus large) [Stefania Montani, 2011].

Dans nos travaux, nous considérons que des connaissances contextuelles ont été formalisées par un expert. Celui-ci n'étant pas en mesure de déterminer systématiquement des connaissances généralement applicables, il formalise certaines d'entre elles en introduisant des paramètres dont les valeurs seront fixées ultérieurement en phase d'exploitation, lorsque l'utilisateur sera en mesure de définir le contexte d'utilisation. Il peut s'agir de connaissances tacites qui, par exemple, sont détenues par un acteur qui sait qu'il existe une relation entre des variables décrivant des objets ou un problème mais n'est pas en mesure de la formaliser explicitement car celle-ci varie selon le contexte. L'expert décrit alors globalement ces relations en y introduisant des paramètres. Afin d'exploiter ces connaissances dans un contexte particulier, les valeurs des paramètres doivent être identifiées à partir des expériences passées en utilisant des outils adaptés. Par exemple, un expert sait qu'il existe une relation entre la masse d'un véhicule m et sa vitesse maximale V_{max} mais il n'est pas en mesure de l'explicitement car elle dépend des catégories de véhicules et donc de son contexte d'exploitation. Il crée alors une connaissance contextuelle $C_1 : V_{max} = \alpha * m$, α étant un paramètre dont la valeur pourra être déterminée par analyse de la masse et de la vitesse maximale dans plusieurs expériences concernant des véhicules.

Ainsi, notre **problématique détaillée** est exprimée ainsi : il s'agit de développer une approche permettant d'aider les décideurs à réaliser leurs tâches en ingénierie système par l'exploitation, en plus de connaissances générales exploitables systématiquement :

- de connaissances contextuelles, paramétrables selon le contexte,
- d'expériences capitalisées dans une base afin de définir les valeurs de paramètres pour ces connaissances.

Ainsi, les expériences viennent en aide aux connaissances contextuelles pour l'aide à la décision. Pour les connaissances contextuelles, nous avons fait le choix de les modéliser à l'aide de Problèmes

de Satisfaction de Contraintes [Montanari, 1974] et de contraintes contextuelles. Pour les expériences, nous avons choisi d'utiliser des ensembles de couples (*Variable, Valeur*). Afin d'être en mesure d'identifier les paramètres, le principe de la recherche de cas similaires du RàPC est utilisé afin d'identifier les expériences qui se sont déroulées dans un contexte similaire. Ensuite, une analyse de ces expériences permet de déterminer des valeurs pour les paramètres (ou des ensembles de valeurs). Afin de fournir une aide à la décision, les connaissances contextuelles utilisent un moteur de filtrage de contraintes qui restreint le domaine des variables utilisées. Le développement de l'ensemble de ces modèles, algorithmes et méthodes constitue le cœur de nos propositions qui sont détaillées dans la section suivante.

4.4.2 Développements

Ces travaux, développés dans le cadre du projet Hélimaintenance et de la thèse d'Aurélien Codet De Boisse [Codet De Boisse, 2013] (PhD.3) ont été abordés également dans [Vareilles et al., 2012a] (A.2). Après des études sur les possibilités d'utilisation conjointe de connaissances générales formalisées sous forme de Problème de Satisfaction de Contraintes et d'expériences capitalisées sous forme d'ensembles de couples (*Variable, Valeur*), nous avons formalisé l'approche illustrée sur la figure 4.10. Lorsqu'une aide à la décision est requise par un décideur en ingénierie système, celui-ci peut utiliser la connaissance capitalisée sous forme de Problème de Satisfaction de Contraintes. Certaines contraintes correspondent à des connaissances générales et d'autres correspondent à des connaissances contextuelles. Un moteur de filtrage de contraintes permet dans un premier temps, en interaction avec l'utilisateur, de réduire les domaines des variables impliquées dans les différentes contraintes. Ensuite, les contraintes contextuelles peuvent être mises en œuvre. Il s'agit de déterminer, en utilisant un outil de RàPC des expériences qui se sont déroulées dans un contexte similaire. Partant de cet ensemble d'expériences, nous identifions des valeurs de paramètres pour les contraintes contextuelles. Une nouvelle utilisation de l'outil de filtrage permet de filtrer ces contraintes contextualisées et de proposer une aide au décideur en offrant des domaines de variables réduits.

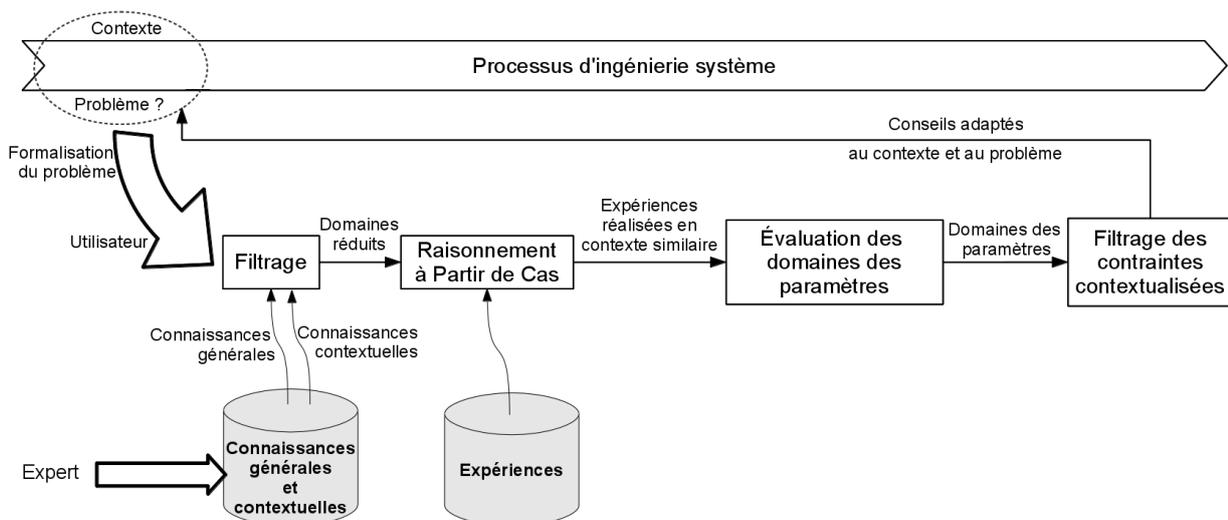


FIGURE 4.10 – Principe de l'exploitation de connaissances contextuelles guidée par les expériences

Une contrainte contextuelle est formalisée à l'aide de l'expression suivante :

$$cc(LV_R, sim_g, ms, LV_C, LV_P, FP) \quad (4.4)$$

où les champs correspondent à :

- LV_R : la liste des variables servant à effectuer la recherche d'expériences similaires dans la base,
- sim_g : la fonction de similarité permettant de comparer un cas cible avec un cas source de la base à partir des variables de LV_R ,
- ms : le seuil de similarité permettant de déterminer les expériences sources retenues,
- LV_C : la liste des variables utilisables pour identifier les paramètres,
- LV_P : la liste des paramètres de la contrainte,
- FP : la fonction permettant de calculer les valeurs de LV_P en fonction des variables de LV_C .

Le filtrage est réalisé à l'aide de l'outil *COFIADÉ* développé par des membres du laboratoire CGI de l'Ecole des mines d'Albi [Vareilles et al., 2012c]. Le filtrage, en étroite interaction avec l'utilisateur, s'effectue sur des variables mixtes (numériques et symboliques). L'outil est centré sur le filtrage et non sur la résolution, le principe étant de réduire les domaines des variables de LV_R selon les choix réalisés par l'utilisateur et en ne conservant que les valeurs autorisées par les contraintes. Les principes mis en œuvre exploitent la méthode de 2-b cohérence [Lhomme, 1993] pour les variables continues et l'arc-cohérence pour les variables discrètes [Bessiere, 1994].

L'outil de RàPC n'exploite que le principe de la recherche d'expériences similaires. L'ensemble des domaines filtrés des variables de LV_R , noté LD_R , constitue le cas cible, ce dernier devant être confronté aux cas sources de la base de cas. Chaque domaine de LD_R est comparé à la valeur de la variable correspondante dans le cas source. Une similarité locale est alors évaluée. La fonction sim_g permet ensuite d'agréger les similarités locales en similarités globales. L'opérateur *GOWA* (voir section précédente) a été utilisé pour cela. Le calcul de similarité est formalisé de la manière suivante. Soit E , un cas source de la base de cas pour lequel on a conservé uniquement les n variables de $LV_R = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ et tel que $E = \{(v_1, valeur(v_1)), (v_2, valeur(v_2)), \dots, (v_n, valeur(v_n))\}$. Soit le cas cible $DV_R = \{d^{v_1}, d^{v_2}, \dots, d^{v_n}\}$ défini par l'ensemble des domaines des variables de LV_R . Si une variable v est symbolique, la similarité locale entre d^v et $valeur(v)$ est donnée par : $sim(d^v, valeur(v)) = \max_{j \in d^v} (sim_v(j, valeur(v)))$. Si la variable v est numérique, la similarité est donnée par l'équation 4.5.

$$sim(d^v, valeur(v)) = \begin{cases} 1 & \text{si } valeur(v) \in d^v \\ \max_{j \in d^v} (sim_v(j, valeur(v))) & \text{sinon} \end{cases} \quad (4.5)$$

Bien sûr, cela sous entend que l'on dispose des fonctions de similarité sim_v entre valeurs de chaque variable v ou que l'on est en mesure de les calculer [Bergmann, 2002]. La similarité globale entre E et DV_R est donnée par la fonction sim_g , c'est-à-dire dans notre cas, par l'opérateur *GOWA* (équation 4.6).

$$Sim(E, LD_R) = \left(\sum_{i=1}^n (1/n) * (sim(d^{v_i}, valeur(v_i))) \right)^{1/\beta} \quad (4.6)$$

Seuls les cas E dont la similarité globale est supérieure ou égale au seuil ms sont conservés pour l'identification des valeurs des paramètres de LV_P .

A partir des cas retenus, **l'évaluation du domaine des paramètres** est réalisée. L'algorithme d'Extraction de Connaissances à partir des Données *APRIORI* [Agrawal et al., 1993] a été utilisé pour cela. Le principe est de déterminer des relations d'implication (Antécédent \Rightarrow Conséquent) à partir des cas identifiés à l'étape précédente et d'en déduire les domaines des paramètres. Plus le domaine des paramètres est restreint, plus la connaissance contextualisée est adaptée au contexte courant.

Suite à la caractérisation des paramètres, un filtrage des contraintes contextualisées permet de réduire les domaines des autres variables impliquées. Le résultat obtenu est un ensemble de domaines de variables réduits qui constitue une aide à la décision pour l'utilisateur.

L'application de cette approche, définie par le contexte du projet FUI Hélimaintenance, se situe dans le domaine de la maintenance d'hélicoptères. Le principe est de permettre aux décideurs (des maintenanciers) d'exploiter des connaissances contextuelles sur la durée et le type d'interventions de maintenance devant être réalisées. Des connaissances générales peuvent être formalisées en exploitant les documents constructeurs. Cependant, il est difficile de déterminer a priori la nature et les durées des interventions à réaliser car celles-ci dépendent du contexte d'exploitation des hélicoptères. Par exemple, un hélicoptère ayant été exploité dans le désert ne va pas nécessiter les mêmes activités de maintenance qu'un autre ayant volé en zone maritime. Même s'il est impossible de définir une connaissance générale, il est tout de même possible à un expert de formaliser des connaissances contextuelles permettant de définir globalement, et avec une précision peu marquée, des durées d'interventions dépendant du contexte à l'aide de paramètres. L'exploitation des expériences de maintenance passées permet de déterminer des valeurs de paramètres correspondant à un contexte d'utilisation similaire et d'aider le décideur à définir plus précisément la durée d'intervention (et donc d'immobilisation) à annoncer à son client. Un exemple est proposé dans la thèse d'Aurélien Codet De Boisse [Codet De Boisse, 2013] (PhD.3) et dans l'article [Vareilles et al., 2012a] (A.2). Une application logicielle a été développée pour le projet FUI Hélimaintenance et a servi également pour valider l'approche sur des exemples. L'outil de RàPC (la recherche de cas à contexte similaire) a été développé en langage java et intégré dans l'application. L'outil de filtrage de contraintes COFIADÉ (<http://cofiade.mines-albi.fr/>) a été intégré et utilisé pour le filtrage des contraintes.

4.4.3 Bilan partiel de la réutilisation de connaissances guidées par les expériences

Ces travaux ont été abordés dans le cadre du projet FUI Hélimaintenance ainsi que dans la thèse d'Aurélien Codet De Boisse (PhD.3). Ils viennent clore le bilan des recherches effectuées sur la réutilisation d'acquis en permettant de formaliser et d'exploiter des connaissances contextuelles s'appuyant sur les expériences passées. Formaliser systématiquement des connaissances générales exploitables dans tous les cas de figure peut s'avérer délicat pour un expert. La possibilité de rester à un niveau global en définissant des contraintes paramétrables permet de disposer de connaissances adaptables en toutes circonstances. Bien entendu, l'efficacité de l'approche est basée sur un certain nombre de conditions :

- un expert est en mesure de définir des connaissances contextuelles en définissant les relations globales entre les caractéristiques des éléments utilisés à l'aide de paramètres au sein d'une contrainte contextuelle,
- la base d'expériences contient suffisamment d'expériences cohérentes afin de pouvoir identifier les paramètres,
- il est possible d'utiliser des fonctions de similarités entre valeurs de variables.

L'approche, bien que générique et utilisable quelque soit le domaine de l'ingénierie système, a été appliquée à la maintenance d'hélicoptères. Des exemples ont permis de montrer qu'il était possible de réduire l'imprécision sur la durée des interventions de maintenance d'un hélicoptère en exploitant des connaissances contextuelles et les expériences de maintenance réalisées par le passé.

Les contributions majeures obtenues suite à ces travaux sont les suivantes :

Contribution 4.7 : La définition de contraintes contextuelles à l'aide de paramètres permettant de formaliser des connaissances dépendant du contexte dans lequel elles seront exploitées. La caractérisation de leur contexte d'exploitation permet d'identifier des valeurs de paramètres et de préciser leur fonctionnement.

Contribution 4.8 : La formalisation d'un outil d'aide à la décision exploitant conjointement des connaissances contextuelles et des expériences. Les connaissances contextuelles (des contraintes contextuelles) sont exploitées dans un outil de filtrage de contraintes qui permet de réduire les domaines des variables impliquées. Les expériences sont exploitées par un outil de raisonnement à partir de cas. Celui-ci permet d'identifier des expériences qui se sont déroulées dans un contexte similaire. De cet ensemble d'expériences, des valeurs de paramètres pour les contraintes contextuelles sont identifiées. Dans cette approche, les expériences viennent en aide au paramétrage des connaissances contextuelles. L'outil fournit une aide à l'utilisateur en lui offrant des domaines de variables réduits selon le contexte, limitant ainsi son espace de décision.

Encadrement : Ce travail est abordé dans la **thèse d'Aurélien Codet De Boisse** [Codet De Boisse, 2013] (PhD.3).

Projet : Ce travail a contribué aux résultats du projet FUI Hélimaintenance.

Publications : Ces travaux sont publiés dans [Vareilles et al., 2012a] (A.2), [Codet De Boisse et al., 2010] (C.3), [Codet De Boisse et al., 2011b] (C.2) et [Codet De Boisse et al., 2011a] (C.1).

4.5 Conclusion

Les travaux synthétisés dans ce chapitre ont constitué une part importante de nos contributions durant les huit dernières années sur les niveaux *Processus, Outils, Expériences/ Connaissances* (voir chapitre 1). L'exploitation de connaissances et d'expériences permet, au moyen d'outils adaptés, de fournir aux décideurs des processus de l'ingénierie système une aide à la décision. Il s'agit notamment de guider vers les choix autorisés, recommandés et opportuns ainsi que de réduire l'espace des décisions, c'est-à-dire le nombre de choix. Dans nos recherches, nous avons considéré trois points de vues différents pour guider les activités de l'ingénierie système : i) le cas où les connaissances métier sont utilisées directement, ii) le cas où les connaissances viennent aider à réutiliser des expériences passées et iii) le cas où ce sont les expériences passées qui viennent guider l'exploitation des connaissances.

Ainsi, ces travaux ont débuté en 2006 par la formalisation d'une approche de résolution de problèmes exploitant des connaissances métiers formalisées au sein d'ontologies et les principes du Raisonnement à Partir de Cas. Afin de bénéficier d'un cadre méthodologique, le retour d'expérience a été mis en œuvre au sein d'un processus de résolution de problèmes, ce qui constitue la démarche générale exploitée au Laboratoire Génie de Production depuis de nombreuses années. Le formalisme des graphes conceptuels a été exploité pour formaliser expériences et connaissances et le mécanisme de projection des graphes conceptuels pour assurer la recherche d'expériences similaires (travaux publiés dans [Kamsu-Foguem et al., 2008] (A.4)). Ce premier volet a constitué un pilier central dans toutes nos approches de réutilisation d'acquis pour aider l'ingénierie système.

Définie par les besoins du projet ANR ATLAS débuté en 2008, nous avons ensuite développé une approche pour la réutilisation de connaissances métier afin de guider les concepteurs et les planificateurs de projets. Nous avons formalisé des connaissances métier au sein d'ontologies dans la **thèse de Joël Abeille** (PhD.2), soutenue par les **masters recherche de Céline Boitte (M2R.3) et Juan Romero (M2R.4)**. Basée sur ces connaissances métiers, la définition de mécanismes de réutilisation d'expériences passées à des fins de guidage de l'activité de conception (et de planification de projets) a pu ainsi être réalisée. Des outils adaptés permettant de rechercher des expériences passées en intégrant les préférences du concepteur dans l'expression des exigences système et en lui permettant également de raisonner à un niveau conceptuel ont constitué une contribution majeure. De même, nous mettons en avant la possibilité de raisonner à partir de similarités conceptuelles dépendant de la structure des ontologies plutôt qu'à partir de mesures de similarités entre caractéristiques de systèmes, généralement délicates à obtenir dans les entreprises. Ces travaux ont été publiés dans [Romero et al., 2014] (A.1). Ils ont contribué au projet ANR ATLAS et au développement de la plate-forme logicielle ATLAS.

Un dernier volet nous a permis d'étudier une approche permettant l'aide à la décision dans un processus d'ingénierie système en exploitant des connaissances dépendant de leur contexte d'exploitation, formalisées à l'aide de problèmes de satisfaction de contraintes et de contraintes contextuelles. Des paramètres introduits dans de telles contraintes permettent à un expert de formaliser de manière globale une connaissance métier sur des relations entre des variables qu'il s'avère impossible d'explicitier de manière précise. En phase d'exploitation de la connaissance, une fois le contexte connu, un outil de Raisonnement à Partir de Cas permet d'identifier des expériences qui se sont déroulées dans un contexte similaire et d'en déduire des valeurs de paramètres. Un outil de filtrage de contraintes permet ensuite de réduire les domaines des variables impliquées et de fournir une aide à décideur. Ces travaux ont été abordés dans la **thèse d'Aurélien Codet De Boisse** [Codet De Boisse, 2013] (PhD.3) et publiés dans [Vareilles et al., 2012a] (A.2). Ils ont également contribué au projet FUI Hélimaintenance.

Chapitre 5

La résolution distribuée de problèmes

5.1 Introduction

Nous abordons dans ce dernier chapitre la problématique de la résolution distribuée de problèmes. Ces travaux ont été réalisés dans le cadre de la thèse en contrat CIFRE de Juan Romero (PhD.4) avec l'entreprise AXSENS à Toulouse. Ils contribuent aux trois niveaux *Processus*, *Outils* et *Expériences/Connaissances*. Ils concernent l'extension de méthodes standardisées de résolution de problèmes à des organisations distribuées comme les chaînes logistiques. Les besoins en processus, modèles et outils sont décrits dans la section suivante exposant notre problématique détaillée. Les développements réalisés dans ces travaux sont ensuite synthétisés dans la section 5.3. Nous terminons ce chapitre avec le bilan des contributions en résolution distribuée de problèmes et la conclusion de ce chapitre.

5.2 Problématique de la résolution distribuée

Les standards de résolution de problèmes tels PDCA, 8D/9S, DMAICS, 7-Steps, etc. sont très efficaces et très répandus pour traiter les problèmes de qualité au sein même des entreprises. Les problèmes sont abordés de manière centralisée en déroulant un processus adapté permettant d'identifier de manière incrémentale les causes racines des problèmes. L'éradication de ces causes racines est d'abord réalisée par des actions correctives de préservation et de confinement qui vont également éviter que le même type de problème ne réapparaisse. Elle est ensuite complétée par des actions préventives. De nos jours, ces outils constituent un levier essentiel de la qualité. D'une part des techniques statistiques et analytiques ainsi que des outils logiciels ont été développés pour mettre en œuvre ces méthodes en pratique [Knowles et al., 2005, IAQG, 2010, AIAG, 2012] et, d'autre part, des processus et des modèles conceptuels ont été proposés dans la littérature [Jabrouni et al., 2011, Pillet et al., 2013]. Des travaux réalisés dans notre équipe au LGP ont montré que ce type de processus pouvait être grandement amélioré en structurant et capitalisant les expériences d'analyse et de résolution des problèmes à des fins de réutilisation ([Ruet and Geneste, 2002, Rakoto, 2004, Jabrouni et al., 2013]). Ainsi l'intégration du retour d'expérience en résolution de problèmes permet aux entreprises non seulement d'avoir des méthodologies de résolution opérationnelles mais également de capitaliser des connaissances contextualisées.

Cependant, cette efficacité dans la résolution de problèmes au sein d'une démarche d'amélioration continue s'avère plus difficile à obtenir dans le cadre des chaînes logistiques. En effet, dans ce contexte, les entreprises tendent à se regrouper dans des réseaux complexes et distribués de sous-traitants, fournisseurs et donneurs d'ordres dans lesquels elles tentent de travailler de la meilleure manière possible. Ceci est réalisé en tentant d'intégrer leurs processus et en coordonnant leurs décisions et activités afin de progresser en synergie vers la satisfaction du client. De nombreux travaux existent dans la littérature sur la gestion des chaînes logistiques (voir par exemple [Harland, 1996, Croom et al., 2000, Botta-Genoulaz et al., 2010]) et aujourd'hui, des solutions matures sont mises en œuvre efficacement. Par contre, l'impact de cette structuration en réseaux distribués de partenaires a une grande importance sur les problèmes et leur résolution. Peu d'approches s'efforcent de repenser les modèles et les cadres méthodologiques pour la gestion de la qualité dans de tels réseaux de partenaires [Foster, 2008]. La gestion de la qualité est l'une des pratiques de collaboration clé qui contribue à améliorer l'efficacité et les performances globales [Evrard-Samuel and Spalanzani, 2009]. L'intégration de la gestion de la qualité dans la chaîne logistique (Supply Chain Quality Management - SCQM) a permis d'avancer la qualité au premier plan. Certains modèles restent cependant au niveau stratégique

[Flynn and Flynn, 2005, Foster, 2008, Evrard-Samuel and Spalanzani, 2009]. D'autres traitent essentiellement des aspects relatifs à la définition d'indicateurs de qualité et de performance adaptés aux chaînes logistiques [Gunasekaran and Kobu, 2007], ou du partage de normes [Behrens et al., 2007], [Knowles et al., 2005] ou bien encore de l'impact de la qualité dans les relations client-fournisseur [Heide and George, 1990], [Wagner and Hoegl, 2006]. D'une manière générale, et malgré les progrès réalisés, la gestion de la qualité est toujours vue aujourd'hui comme un processus centralisé. Notre problématique s'intéresse donc à proposer des modèles, des processus et des outils opérationnels permettant la résolution de problèmes dans ce contexte distribué, tout en se basant sur les expériences et connaissances capitalisées.

Au niveau des processus de résolution, les méthodes actuelles telles PDCA, DMAICS, 8D, 7-Steps sont basées sur des processus plutôt centralisés mais parfaitement clairs et opérationnels. Il s'agit donc de transformer ces processus afin de les rendre opérants en environnement distribué. En fragmentant le processus de résolution, de nombreuses difficultés apparaissent. Les informations permettant de résoudre les problèmes n'étant plus centralisées mais distribuées sur les différents partenaires, il est nécessaire de définir des méthodes et des outils permettant d'identifier les détenteurs de ces fragments d'informations et de les mettre à disposition des acteurs de la résolution. Ces informations peuvent être scindées en deux catégories : les informations concernant les aspects techniques et les informations concernant les aspects collaboratifs. Le problème est à double face : d'une part il s'agit de déterminer quels partenaires inclure dans le processus distribué de résolution de problèmes selon la nature du problème, les processus concernés, la structure des systèmes et, d'autre part, de constituer des équipes de résolution les plus à même de collaborer pour converger vers des solutions efficaces sur toute la chaîne logistique. Ceci nécessite des outils d'aide à la décision adaptés afin d'aider le processus de résolution de problèmes qui se déroule en parallèle du processus d'ingénierie système. La résolution de problèmes, nous l'avons abordé dans le chapitre précédent, est grandement facilitée par l'exploitation de connaissances métier et d'expériences passées.

Notre **problématique détaillée** se résume ainsi : il s'agit de définir un cadre conceptuel et un processus générique permettant de résoudre un problème de manière distribuée sur une chaîne logistique. Ce processus doit s'appuyer sur des outils d'aide à la décision qui vont permettre d'identifier et collecter les informations nécessaires aux analyses et de constituer des équipes performantes, possédant les connaissances et les compétences requises et collaborant dans un but commun de résolution. Des modèles adaptés doivent permettre de modéliser les informations qui sont distribuées sur la chaîne logistique et les rendre exploitables par les outils dédiés. Les aspects collaboratifs entre partenaires doivent être pris en compte afin de garantir la constitution d'équipes pluridisciplinaires, compétentes, suffisamment informées et travaillant vers un objectif commun : l'analyse et l'élimination des problèmes issus de la chaîne logistique. Enfin, les outils proposés doivent se baser sur des connaissances métier et des expériences de résolution passées. Les développements réalisés sont synthétisés dans la section suivante (section 5.3).

5.3 Développements

Les propositions réalisées dans ces travaux sont structurées en trois parties : le processus distribué de résolution de problèmes, le modèle d'information et les outils d'aide à la décision développés. Nous détaillons ces trois propositions dans les sections suivantes.

5.3.1 Vers un processus distribué de résolution de problèmes

Nous avons vu dans le chapitre 1 que, dans l'approche développée au LGP, le processus de résolution était composé des activités de définition du contexte du problème détecté, d'analyse des causes racines, de définition de solutions et de généralisation. Ce processus générique est représenté de manière plus détaillée sur la figure 5.1.

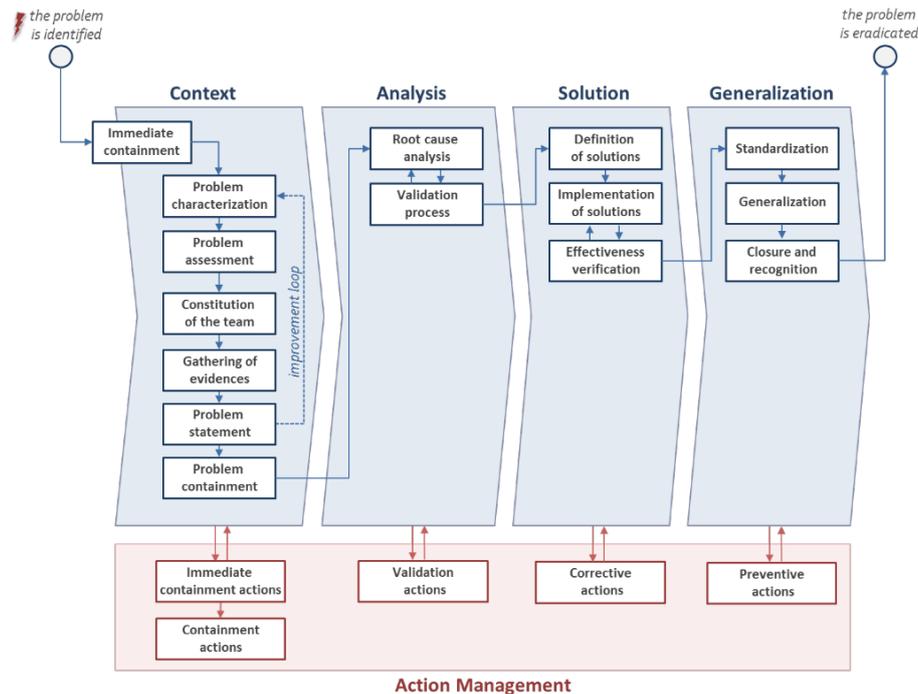


FIGURE 5.1 – Processus générique de résolution de problèmes [Romero, 2013]

L'activité de définition du contexte permet de rassembler les informations nécessaires à la résolution (caractéristiques du problème, constatations, mesures, personnes impliquées, etc.), de constituer une première équipe de résolution et de confiner le problème afin d'éviter sa propagation. Dans un contexte distribué, il est nécessaire de disposer d'informations sur les systèmes impactés par le problème et les partenaires susceptibles de participer à sa résolution.

L'activité d'analyse permet d'identifier la cause principale du problème. Cela passe par l'identification des causes supposées du problème dans une démarche de recherche de causes et d'effets [Jabrouni et al., 2011]. Des outils comme le *diagramme d'Ishikawa* ou la méthode des *5-pourquoi* permettent d'accompagner la démarche. Chaque cause suspectée nécessite ensuite d'être consolidée, vérifiée et validée ou invalidée. Cette activité permet de définir un *arbre des causes* représentant tous les enchaînements de causes et d'effets suspectés, validés et invalidés. Pour une résolution distribuée, les causes de problèmes peuvent être liées à d'autres partenaires de la chaîne logistique.

L'activité de définition de solutions permet de mettre en œuvre les solutions qui vont éradiquer les causes racines validées à l'étape précédente et de mesurer leur efficacité. Ici encore, dans un contexte distribué, les actions peuvent être mises en œuvre chez différents partenaires d'où la nécessité d'une bonne collaboration.

L'activité de généralisation permet de standardiser les solutions obtenues et les rendre applicables

plus globalement dans l'entreprise, souvent dans un but préventif.

Ainsi, dans le contexte d'une chaîne logistique, le processus de résolution est distribué (les effets peuvent se propager chez plusieurs partenaires, les causes peuvent provenir de différents partenaires, les solutions peuvent impacter les activités de plusieurs partenaires et leur mise en œuvre nécessite une bonne collaboration. Suite à ce constat étudié en détails dans la thèse de Juan Romero [Romero, 2013] (PhD.4), nous avons proposé un processus de résolution distribué sur les partenaires de la chaîne logistique impactés par le problème. L'arbre des causes permet de guider la démarche de résolution distribuée représentée sur la figure 5.2.

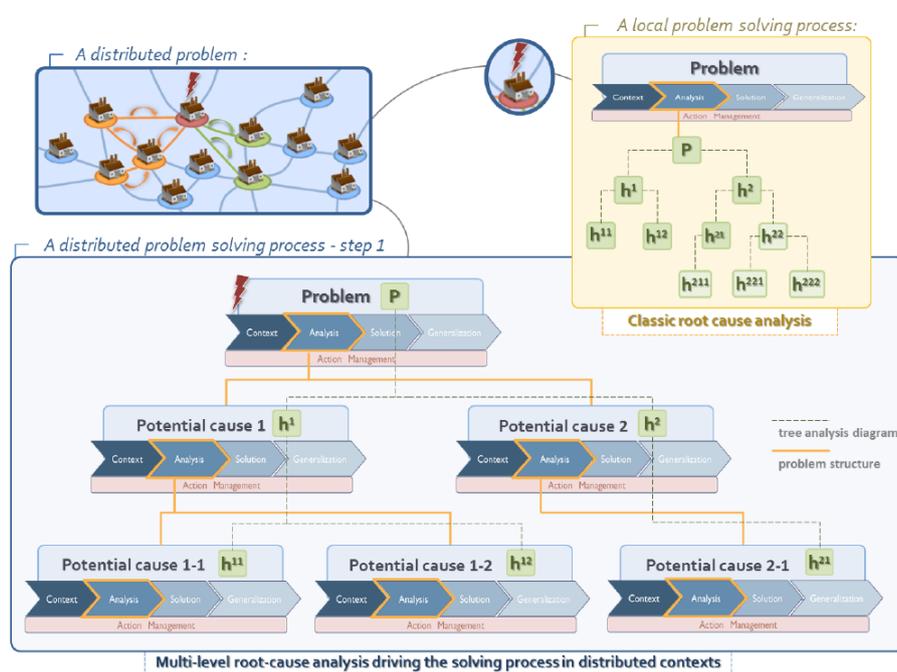


FIGURE 5.2 – Processus de résolution de problèmes distribué [Romero, 2013]

Partant de l'identification d'un problème chez un partenaire de la chaîne logistique, le processus de résolution de problèmes est mis en œuvre. L'activité d'analyse permet d'identifier des causes potentielles (des hypothèses) et, lorsqu'elles sont du ressort d'un autre partenaire, un processus de résolution dédié peut être mis en œuvre chez celui-ci dans une approche descendante. Au plus bas niveau, lorsque des causes racines sont validées, le processus permet de remonter selon l'arbre des causes avec la définition des solutions et leur éradication. Les analyses des causes invalidées sont conservées au sein des expériences de résolution et ré-exploitable pour de futures résolutions, au même titre que celles des causes validées.

Afin de permettre à ce processus de fonctionner, nous avons défini des informations rassemblées au sein d'un modèle à deux niveaux. Il s'agit des informations à caractère technique fédérées dans le modèle *Technical Breakdown Structure* (TBS) et des informations à caractère collaboratif fédérées dans le modèle *Collaborative Breakdown Structure* (CBS). Nous décrivons ces deux modèles dans la section suivante.

5.3.2 Les modèles *Technical Breakdown Structure* et *Collaborative Breakdown Structure*

Le modèle *Technical Breakdown Structure* (TBS) permet de représenter les informations inhérentes à la chaîne logistique et à ses aspects techniques et organisationnels. Le modèle permet de fédérer les informations techniques sur les systèmes et leur structure (systèmes/sous-systèmes), les informations sur les différents partenaires de la chaîne logistique, sur les transporteurs ainsi que les informations sur les processus métier dans lesquels les partenaires sont impliqués (conception, industrialisation, fabrication/assemblage, transports). Le modèle TBS est composé d'un réseau de *Technical Packages* (TP). Un TP permet de fédérer toute l'information inhérente à un partenaire de la chaîne logistique selon des aspect *Système*, *Processus* et *Réseau*. Les nœuds de l'arborescence représentent les *Technical Packages* et les arcs représentent les relations entre partenaires. La structure du réseau est représentative de la nomenclature du système. Chaque TP_i ne fournit, en sortie, qu'un seul système e_i . Un exemple de modèle TBS est représenté sur la figure 5.3. Ce modèle a été présenté dans [Romero et al., 2012b] (B.5).

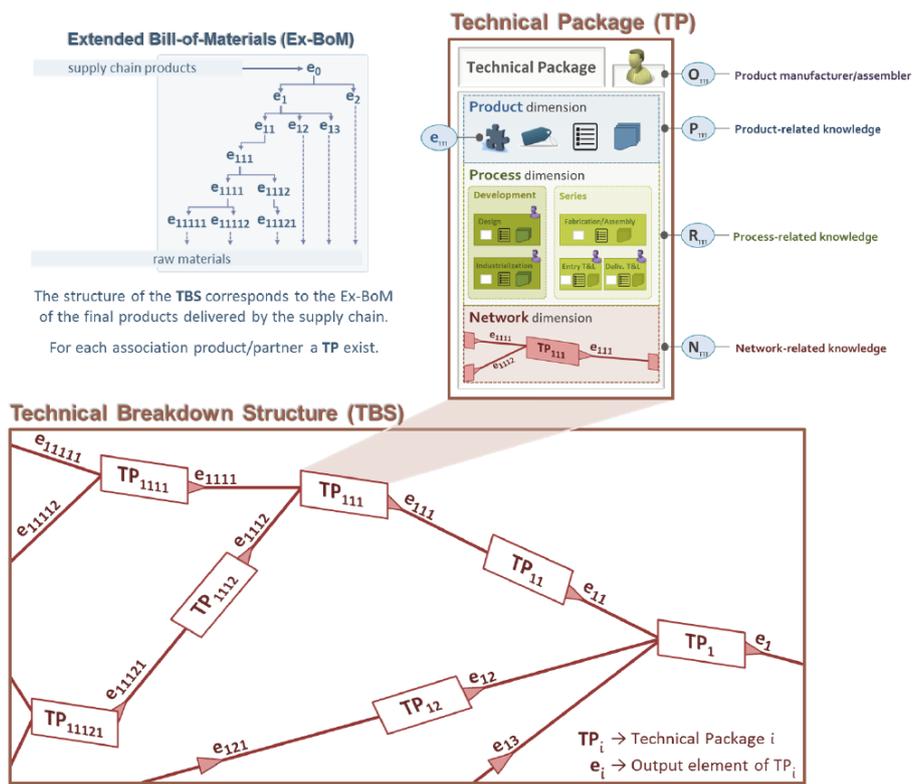


FIGURE 5.3 – Modèle *Technical Breakdown Structure* fédérant les informations à caractère technique et organisationnel propres aux partenaires de la chaîne logistique [Romero, 2013]

Le modèle *Collaboration Breakdown Structure* (CBS) permet de représenter les informations concernant les partenaires de la chaîne logistique et la manière avec laquelle ils sont en mesure de collaborer pour résoudre les problèmes. Le modèle CBS est composé d'un ensemble de Collaboration Packages (CP). Chaque CP est associé à la résolution d'un problème ou à l'analyse d'une cause suspectée. Il comporte l'ensemble des informations sur les acteurs impliqués dans ce genre d'activité

(entreprise, compétences, domaine d'expertise, etc.). La structure du CBS est construite progressivement en même temps que l'arbre des causes (figure 5.4). Par exemple, dans la figure 5.4, le CP $CP^P(4)$ correspond aux acteurs impliqués dans l'analyse de la cause h_{11} . Les informations contenues dans un CP permettent de caractériser la manière dont les acteurs collaborent pour la résolution d'un problème. Des évaluations des performances de l'association d'acteurs sont réalisées a posteriori à l'aide d'outils dédiés et permettent, lors de constitutions d'équipes ultérieures, de réaliser des associations pertinentes (voir l'outil d'évaluation des partenaires).

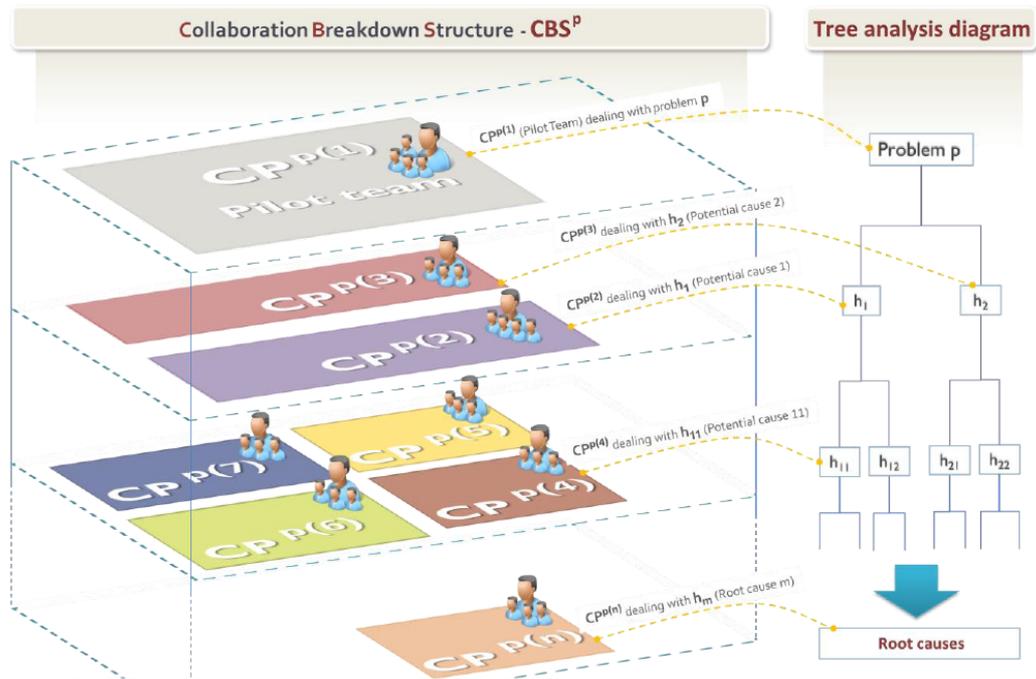


FIGURE 5.4 – Modèle *Collaboration Breakdown Structure* fédérant les informations à caractère collaboratif propres aux acteurs de la résolution dans la chaîne logistique [Romero, 2013]

5.3.3 Les outils d'aide à la résolution distribuée

Dans le cadre de la thèse de Juan Romero, nous avons développé de nombreux outils permettant d'aider le processus de résolution distribuée. Nous détaillons ici trois d'entre eux : 1) le filtrage structurel, 2) le filtrage conceptuel et 3) l'évaluation des partenaires.

L'outil de filtrage structurel exploite le modèle TBS en restreignant le nombre de partenaires à ceux qui sont « proches » du problème dans le réseau. Nous entendons ici une proximité structurelle dictée par la hiérarchie de systèmes et sous systèmes. Nous obtenons ainsi un modèle TBS simplifié comportant les TP structurellement proches et donc potentiellement intéressants pour la résolution. Soit TP^p , un TP correspondant à une entreprise partenaire où un problème p a été détecté. Nous constituons TBS_{contr}^p , l'ensemble de tous les TP prédécesseurs de TP^p dans TBS qui contribuent potentiellement au problème. Puis par sélection des constituants clés (suppression des TP et des branches inintéressantes dans TBS_{contr}^p), nous constituons l'ensemble $TBS_{contr_w}^p$ des TP potentiellement contributeurs au problème p . Le calcul d'un degré de proximité pour chaque TP de l'ensemble $TBS_{contr_w}^p$

et l'utilisation d'un seuil α permet de ne conserver que l'ensemble $TBS_{contr_s1}^p$ les TP potentiellement contributeurs et proches du problème p et tel que $TBS_{contr_s1}^p = \{TP_i\}, TP_i \in TBS_{contr_w}^p, s_{1i} \geq \alpha$. Le degré de proximité s_{1i} de TP_i par rapport à TP^p est donné par l'équation 5.1 :

$$s_{1i} = 1 - \frac{|LTP^p - LTP^i|}{|L - LTP^p|} \quad (5.1)$$

dans laquelle :

- LTP^p est le niveau de TP^p dans la chaîne logistique,
- LTP^i est le niveau de TP^i dans la chaîne logistique,
- L est le nombre de niveaux dans la chaîne logistique.

L'outil de filtrage conceptuel exploite également le modèle TBS mais cette fois, la sélection des TP potentiellement contributeurs est réalisée en évaluant la similarité sémantique entre le système subissant le problème et les système correspondants aux TPs de TBS et en la confrontant à un seuil β . Pour cela, nous considérons que les concepts de systèmes sont capitalisés dans une ontologie et constituent une connaissance métier où la similarité sémantique entre concepts correspondants à des systèmes peut être calculée à l'aide de la formule de Wu et Palmer [Wu and Palmer, 1994] (voir chapitre 4, section 4.3.2). Ainsi, nous construisons l'ensemble $TBS_{contr_s2}^p$ tel que $TBS_{contr_s2}^p = \{TP_j\}, TP_j \in TBS, s_{2j} \geq \beta$. La similarité sémantique s_{2j} entre le système subissant le problème e^p et un système e^j fourni par TP_j est donnée par l'équation 5.2 :

$$s_{2j} = sim(e^p, e^j) = \frac{2 * depth(CCA)}{depth(e^p) + depth(e^j)} \quad (5.2)$$

dans laquelle :

- $depth(CCA)$ est la profondeur dans l'ontologie du plus proche ancêtre commun à e^p et e^j ,
- $depth(e^p)$ est la profondeur dans l'ontologie de e^p ,
- $depth(e^j)$ est la profondeur dans l'ontologie de e^j .

Des exemples détaillés de filtrages structurels et conceptuels sont donnés dans la thèse de Juan Romero [Romero, 2013](PhD.4).

Les ensembles de TPs filtrés obtenus à l'aide des deux outils précédents permettent de fédérer l'information nécessaire à la résolution du problème. Il s'agit maintenant de constituer les équipes qui vont mener la résolution.

L'outil d'évaluation des partenaires va permettre d'aider à déterminer les membres des CP en observant les aspects collaboratifs entre partenaires des TPs de TBS. Il s'agit d'évaluer, pour chaque acteur potentiel dans quelle mesure il est proche techniquement du problème et dans quelle mesure il est compatible pour collaborer efficacement à la résolution du problème. Le premier indicateur lié à un partenaire a , (c^a) est évalué en confrontant les compétences techniques requises pour participer à la résolution du problème selon quatre champs. L'indicateur c^a d'un partenaire a est calculé selon l'équation 5.3 (opérateur GOWA) :

$$c^a = \left(\sum_{i=1}^4 \omega_i * (Ca_i(a))^\lambda \right)^{1/\lambda} \quad (5.3)$$

dans laquelle :

- $Ca_1(a)$ est le niveau de proximité structurelle du partenaire a vis-à-vis du problème,
- $Ca_2(a)$ est le niveau de proximité sémantique du partenaire a vis-à-vis du système à analyser,
- $Ca_3(a)$ est le niveau d'expertise du partenaire a vis-à-vis des domaines techniques abordés dans le problème,
- $Ca_4(a)$ est le niveau d'expertise du partenaire a vis-à-vis des processus impactés par le problème,
- λ est le paramètre de réglage de l'opérateur GOWA.

Le second indicateur de compatibilité du partenaire a , $Comp^a$ exploite le retour d'expérience capitalisé lors de la résolution de précédents problèmes : seuls les partenaires ayant un indicateur de compatibilité suffisant sont intégrés au CP pour le problème courant. Une vingtaine de critères de collaborativité ont été étudiés dans la thèse de Juan Romero et, pour chaque critère, un indicateur correspondant au partenaire a est évalué selon le retour d'expérience. Les indicateurs obtenus sont agrégés en utilisant de nouveau l'opérateur GOWA afin de construire la compatibilité $Comp^a$. L'analyse des indicateurs c^a et $Comp^a$ permet d'aider les décideurs de choisir d'intégrer à un CP des partenaires compétents techniquement et ayant un bon indicateur de compatibilité.

D'autres outils permettant notamment l'exploitation d'expériences passées ont été développés de même que des cadres méthodologiques pour évaluer l'indicateur de compatibilité ou intégrer les préférences du décideur dans la constitution des équipes de résolution. Nous avons également discuté dans [Romero et al., 2012a] (B.4) l'impact de cette méthodologie de résolution distribuée sur la qualité des produits. Nous avons pu montrer que ce processus était fortement couplé à celui d'ingénierie système. Alors que les activités de support de l'ingénierie système sont généralement réalisées pour venir en aide aux activités de réalisation et d'utilisation (voir chapitre 1, figure 1.2), nous avons montré qu'elles pouvaient concerner l'ensemble des activités du processus d'ingénierie système. En effet, les analyses pouvant cibler un problème de conception système, les solutions peuvent impacter les phases amont du processus d'ingénierie système en requérant la reconception de certaines parties. Les partenaires impliqués sont alors des concepteurs qu'il s'agit d'intégrer aux équipes de la résolution distribuée.

Un premier niveau de **validation** de ces travaux a été effectué en déployant la méthode sur un cas fourni par un partenaire industriel de l'entreprise Axsens dans le domaine de l'industrie aéronautique. Cet exemple ainsi que la panoplie complète d'outils sont décrits dans la thèse de Juan Romero [Romero, 2013](PhD.4).

5.4 Conclusion

La résolution de problèmes est une activité clé de la qualité dans les entreprises. Des standards industriels performants (DMAICS, 8D, 7-Steps, PDCA, etc.) constituent des outils de l'amélioration continue efficaces et opérationnels. Depuis plusieurs années, le laboratoire LGP, en partenariat avec des entreprises, a développé un processus générique basé sur les activités de caractérisation du contexte d'un problème, d'analyse des causes racines et de construction de solutions permettant de les éradiquer. Dans le retour d'expérience, chaque résolution est une expérience capitalisée à des fins de réutilisation ultérieure. Nous avons proposé des contributions dans le chapitre 4 concernant la formalisation d'outils permettant d'exploiter des expériences pour aider la résolution de problèmes. Dans

ce chapitre, nous poursuivons en proposant un cadre méthodologique ainsi qu'une panoplie d'outils permettant de résoudre un problème de manière distribuée dans le cadre d'une chaîne logistique.

Les contributions majeures de ce travail sont les suivantes :

Contribution 5.1 : La formalisation d'un processus distribué de résolution de problèmes parfaitement cohérent avec les standards industriels actuels. Ce processus permet, dans le cadre d'une chaîne logistique, de mener les résolutions en suivant un arbre des causes qui va permettre d'identifier les partenaires de la chaîne logistique impliqués dans l'occurrence des causes et donc, à les impliquer dans leur éradication.

Contribution 5.2 : La formalisation d'un modèle d'informations utile à la résolution distribuée de problèmes. Ce modèle à deux niveaux (Technical Breakdown Structure - TBS et Collaborative Breakdown Structure - CBS) permet de fédérer des informations naturellement fragmentées sur l'ensemble de la chaîne logistique. Le modèle TBS fédère les informations à caractère technique et organisationnel sur les systèmes, les processus, les transports et les relations entre partenaires de la chaîne logistique. Le modèle CBS fédère des informations sur la collaboration des partenaires pour la résolution de problèmes et permet de constituer des équipes qui collaborent efficacement dans un but commun d'éradication des causes de problèmes.

Contribution 5.3 : La formalisation d'outils d'aide à la décision en résolution distribuée de problèmes. Les outils de filtrage structurel et conceptuel permettent, une fois le contexte du problème caractérisé, d'identifier dans le modèle TBS les éléments d'information pertinents pour la résolution. Cela permet notamment d'identifier les entreprises partenaires pouvant potentiellement contribuer aux analyses et à l'élaboration des solutions.

Contribution 5.4 : La formalisation d'un outil d'aide à la décision permettant de constituer des équipes de résolution de problèmes en évaluant la compatibilité entre partenaires. Des critères permettent de mesurer, dans une démarche de retour d'expérience, la manière dont les partenaires collaborent pour résoudre les problèmes. Lors de la constitution d'une équipe devant résoudre un nouveau problème (ou étudier une cause suspectée), la consultation d'un indicateur agrégé de compatibilité permet d'associer des partenaires compatibles et pouvant travailler en synergie vers un objectif commun.

Encadrement : Ce travail a été abordé dans la **thèse de Juan Romero** [Romero, 2013](PhD.4).

Projet : Ce travail a été réalisé en partenariat avec l'entreprise AXSENS-BTE dans un contrat CIFRE.

Publications : Ces travaux, publiés dans [Romero et al., 2012b] (B.5) et [Romero et al., 2012a] (B.4), ont reçu chacun un prix de type « Best Paper award ».

Chapitre 6

Conclusion et projet de recherche

6.1 Synthèse des chapitres

Cette seconde partie du document a permis de synthétiser l'ensemble de mes travaux de recherche réalisés entre 2001 et 2014. Dans le **chapitre 1**, la problématique globale de mes travaux a été définie accompagnée d'un premier niveau d'étude bibliographique. Ce chapitre a permis de définir un cadre général schématisé par un modèle à trois niveaux : *Processus, Outils, Expériences / Connaissances*. L'ensemble de mes activités est ainsi basé sur la formalisation d'outils d'aide à la décision intervenant au sein des processus industriels qui gravitent autour de l'ingénierie système. L'ensemble de ces outils, qui utilisent des techniques d'intelligence artificielle, exploite conjointement ou indépendamment des expériences (dans une démarche de retour d'expérience) ainsi que des connaissances. Par conséquent, systématiquement dans mes travaux, les contributions ont permis d'améliorer les processus notamment par la définition de points de couplage ou d'intégration de certains processus de l'ingénierie système. Conjointement, les besoins de solutions d'aide à la décision au sein de ces processus ont été mis en avant et des solutions globales proposées. L'équipe Systèmes Décisionnels et Cognitifs (SDC) du laboratoire LGP travaille depuis de nombreuses années sur la formalisation et l'outillage de processus de retour d'expérience en collaboration avec des industriels du grand sud-ouest. Nos travaux s'inscrivent parfaitement dans cette démarche en proposant systématiquement un guidage des outils d'aide à la décision par l'exploitation d'expériences et de connaissances. Ce premier chapitre a permis de définir les besoins ainsi que les problématiques globales abordées, en les confrontant à ceux identifiés dans la littérature. Les travaux réalisés sont ensuite détaillés dans les chapitres 2, 3, 4 et 5 définis selon les outils développés :

- la reconfiguration des systèmes transitiques,
- la planification de projets d'ingénierie système,
- la réutilisation d'acquis en ingénierie système,
- la résolution distribuée de problèmes.

Ces outils ont été définis soit au sein de projets institutionnels (ANR ou FUI), soit en partenariat avec des industriels dans des contrats CIFRE, soit en tant que projets indépendants.

Le **chapitre 2** a permis de synthétiser nos travaux sur la reconfiguration des systèmes transitiques réalisés au laboratoire LESTER à Lorient entre 2001 et 2004. L'apport au niveau des *Processus* concerne la mise en interaction du processus de conception de la commande d'un système transitique avec le processus de conception de sa partie opérative ainsi qu'avec les activités de pilotage en phase d'*utilisation* et de *support* de l'ingénierie système. Il est en effet possible de concevoir, dès les premières phases du processus d'ingénierie système, des systèmes parfaitement intégrés et dont la commande a pu être simulée et validée afin d'être mise en œuvre efficacement en phase d'utilisation par le pilotage. Au sein de la commande, nous nous sommes particulièrement intéressés à la reconfiguration qui consiste en une adaptation tant de la partie commande que de la partie physique d'un système lors de l'occurrence de défaillances en phase d'utilisation. Notre contribution au niveau *Outils* a été de concevoir cette reconfiguration de manière à ce qu'elle puisse être mise en œuvre par l'activité de *Support* lors de phase d'utilisation et ce, quel que soit le problème détecté. Pour cela, nous avons adapté une approche flexible à base de systèmes multiagents permettant une conception par intégration d'agents représentant des parties de système transitique. La reconfiguration est envisagée par la coopération des agents chargés de trouver de manière autonome, des solutions de reconfiguration et de les mettre en œuvre en exploitation. En phase de conception, des scénarios peuvent être testés afin de valider la re-

configuration mais l'approche est basée sur l'auto-adaptation du système en cas de problèmes. Ainsi, nous avons contribué au niveau des outils en proposant une approche par système multiagent et par algorithme de fourmis. Les *Connaissances* des agents représentent les possibilités qu' 'a l'agent de réaliser des fonctions de transitique telles que transférer, aiguiller, bloquer, stocker, etc. Le formalisme employé est un graphe (Graphe d'Accessibilité Opérationnelle) représentant l'ensemble des possibilités de réalisation de fonctions par l'agent avec les contraintes d'antériorités. L'interaction des agents permet de constituer un graphe global à partir de graphes partiels. L'occurrence d'une défaillance dans le système transitique se traduit, après détection, par la modification des graphes concernés. L'outil à base de colonie de fourmis que nous avons proposé permet d'identifier un nouveau chemin dans les graphes partiels en cherchant une solution globale qui minimise les temps de cycle. Des agents modélisant les produits permettent de piloter cette reconfiguration en créant une colonie d'agents Fourmis chargés de trouver un nouveau chemin. Bien sûr, l'approche ne fonctionne que si des redondances sont possibles, ce qui est généralement le cas dans les systèmes transitiques organisés autour d'anneaux de transfert vers des postes de production multiples. Au cours de ce travail, **j'ai encadré Mohcen Benlagha dans le cadre de son DEA**. Ces travaux ont été publiés dans [Coudert et al., 2002] (B.26), [Coudert et al., 2003] (B.21). Ces travaux ont constitué une passerelle essentielle entre mon activité de recherche en thèse basée sur le pilotage et l'activité de planification de projets d'ingénierie système abordée ensuite au LGP. Outre les contributions pour la reconfiguration des systèmes transitiques, ces travaux m'ont permis de d'appréhender l'idée que, dès les premières phases de l'ingénierie système, il est possible de formaliser des choix, des possibilités ou des alternatives dans un graphe de tâches afin d'y rechercher des solutions, le cas échéant optimales. Même si beaucoup d'incertitudes demeurent à ce stade, il est possible de prendre très tôt un certain nombre de décisions essentielles. Ce principe est mis en œuvre dans le cadre de l'optimisation en sélection de scénarios de projets que nous avons étudié dans le chapitre 3.

Ainsi, dans le **chapitre 3**, la planification de projets d'ingénierie système a été étudiée. Suite à des études menées au sein du projet ANR ATLAS, il a été constaté des manques concernant les interactions entre les processus d'ingénierie système et de planification de projets. Critiquée dans la littérature, l'intégration de ces deux processus clé pose un certain nombre de problèmes. Tout d'abord, il s'avère que des problèmes de gouvernance apparaissent entre planificateurs et concepteurs, les uns subissant les choix des autres dans une approche hiérarchique sans réelle possibilité de négociation ou de simple échanges d'informations. Il s'avère également qu'un manque d'outil d'aide à la décision intégrant ces deux processus ne facilite pas les échanges harmonieux. Ainsi, au niveau *Processus*, nous avons proposé une approche permettant de mettre en interaction ces processus en définissant des points de couplages favorisant un fonctionnement mieux intégré. Au niveau *Outils*, l'instrumentation de deux types de couplages a été définie : le couplage informationnel et le couplage comportemental. Le couplage informationnel s'assure que les informations sont parfaitement intégrées et cohérentes. Le couplage comportemental s'assure de la bonne synchronisation des deux processus. Contribuant au niveau *Expériences / Connaissances*, des connaissances méthodologiques ont été formalisées pour venir en aide aux couplages. Elles permettent de définir, grâce à des diagrammes UML, un modèle d'information intégré à mettre en œuvre systématiquement. Pour compléter le modèle, un processus de synchronisation a été défini grâce au formalisme BPMN et des règles de synchronisation ont été formalisées afin de contrôler ce processus. La formalisation de ces connaissances méthodologiques a joué un rôle majeur pour la spécification du logiciel ATLAS, un démonstrateur

chargé de d'illustrer et de valider nos travaux. Ce travail a constitué un volet important de la **thèse de Joël Abeille**, co-encadrée avec le laboratoire CGI de l'École des mines d'Albi, et des livrables du projet ANR ATLAS dont j'avais la responsabilité scientifique d'un lot de travail (WP1). Ces travaux ont été publiés dans [Aldanondo et al., 2011] (E.1), [Abeille et al., 2009] (C.5), [Abeille et al., 2010] (B.10), [Coudert et al., 2011a] (B.8), [Vareilles et al., 2012b] (B.6).

Le second volet de ce chapitre 3 concerne l'aide à la planification de projets. L'interaction des processus d'ingénierie système et de planification de projets de réalisation des systèmes conçus a été étudiée dans le cadre de la **thèse de Paul Pitiot**. Il s'avère que dès les premières phases d'un processus d'ingénierie système (notamment en conception préliminaire), il est possible de fédérer dans un graphe un ensemble de choix possibles et d'exploiter un outil d'aide à la décision permettant de rechercher, au regard des critères de minimisation des coûts et de minimisation des temps de cycle, des scénarios Pareto-optimaux. Les choix possibles sont ceux de conception et de réalisation (structure des systèmes, technologies, fournisseurs, ressources, sous-traitance, etc.). Même si de nombreuses incertitudes demeurent, la possibilité d'évaluer les scénarios au plus tôt permet un réel avantages aux entreprises, notamment dans les phases de réponses à appels d'offres. Ainsi, l'ensemble des choix connus sont formalisés au sein d'un graphe de projet contenant l'ensemble des tâches avec les contraintes d'antériorités, de séquençement, de parallélisme, etc. Notre contribution au niveau *Outils* a consisté à proposer un Algorithme Evolutionnaire (AE) permettant la recherche de scénarios Pareto-optimaux. Ces algorithmes ayant un fonctionnement naturellement aveugle de par les choix aléatoires qui sont réalisés, un AE guidé par des connaissances décisionnelles fédérées au sein d'un réseau bayésien a été proposé. Au niveau *Expériences / Connaissances*, les probabilités contenues dans le réseau bayésien permettent de représenter l'influence des décisions sur la satisfaction des objectifs. Ces probabilités servent à biaiser les opérateurs évolutionnaires (sélection, mutation, croisement) afin de converger plus rapidement. Un processus d'apprentissage basé sur l'algorithme *Expectation-Maximization* (EM) permet de constituer et mettre à jour les connaissances décisionnelles dans le réseau bayésien. L'apprentissage est réalisé sur des expériences réelles ainsi que sur des expériences simulées par l'algorithme lui-même (les individus), participant ainsi au retour d'expérience. Ces travaux ont été publiés dans [Pitiot et al., 2010] (A.3), [Pitiot et al., 2007a] (B.16), [Pitiot et al., 2007b] (B.14), [Pitiot et al., 2008] (B.13), [Pitiot et al., 2009] (B.12).

Le **chapitre 4** a permis d'aborder une part importante de la problématique abordée durant la période 2004 à 2014 au laboratoire LGP : la réutilisation d'acquis pour aider les processus autour de l'ingénierie système. Trois types d'outils d'aide ont été définis :

- l'aide par l'exploitation de connaissances métier,
- l'aide par l'exploitation d'expériences guidée par les connaissances métier,
- l'aide par l'exploitation de connaissances contextuelles guidées par les expériences.

Ainsi, le premier volet a permis de définir des ontologies contenant de la connaissance métier sous la forme d'une fédération de concepts. Leur application a d'abord concerné un processus de résolution de problèmes dans une démarche de retour d'expérience. Les modèles d'expériences développés au LGP depuis plusieurs années (une expérience est décrite par un événement survenant dans un contexte et nécessitant une analyse menant à des solutions d'éradication de ses causes) ont été utilisés et instrumentés grâce à l'utilisation des concepts. Le formalisme des graphes conceptuels a permis de construire des modèles d'expériences génériques et utilisables systématiquement lors de la mise en œuvre d'un processus de résolution de problèmes. L'apport principal est d'avoir construit des modèles

d'expériences, bâtis sur une base solide de concepts à la sémantique claire et non ambiguë et aisément réutilisables. La seconde application concerne les processus couplés de planification de projets et de conception de systèmes dans le cadre du projet ANR ATLAS. Des concepts correspondants à des systèmes contiennent, en plus de leur définition, des modèles de type *problèmes de satisfaction de contraintes* permettant de définir les possibilités et interdictions lors de leur utilisation en conception ou en planification. Ainsi, nous avons proposé d'exploiter ces concepts afin de bâtir des modèles d'exigences et de solutions pour des systèmes à concevoir. L'aide à la décision est directement fournie aux concepteurs et aux planificateurs par l'exploitation des problèmes de satisfaction de contraintes embarqués dans les concepts qui restreignent les domaines des paramètres (ou des variables) de conception et de planification. Ce travail a été abordé dans la thèse de Joël Abeille.

Le second volet a permis de définir des outils basés sur le Raisonnement à Partir de Cas permettant de réutiliser des expériences de conception de systèmes. Le processus, intégré à celui de l'ingénierie système, est guidé par l'exploitation des connaissances métier (des concepts dans une ontologie). La première utilisation a été proposée en résolution de problèmes. L'apparition d'un nouvel événement dans son contexte mène à la recherche dans une base d'expériences de cas similaires ou il est possible, par adaptation, de réutiliser les analyses et les solutions. L'opérateur de projection des graphes conceptuels a été utilisé ici afin d'identifier ces cas similaires. L'avantage majeur est de pouvoir spécifier la requête (le cas cible) à l'aide d'un graphe conceptuel en restant à un niveau conceptuel si nécessaire. De plus, il n'est pas nécessaire de disposer de mesures de similarités entre descripteurs car c'est la position relative des concepts dans l'ontologie qui permet à l'opérateur de projection d'identifier si un cas source est une spécialisation du cas cible ou non. La seconde application concernait la conception de systèmes. Un processus de réutilisation d'expériences de conception a été défini. Le principal apport concerne l'activité de réutilisation du RàPC dans laquelle une approche basée sur l'exploitation de similarités conceptuelles entre concepts de l'ontologie permet de définir une mesure de compatibilité entre cas cible et cas sources. Cette approche prend en compte également les préférences du concepteur et permet, ici également, de s'affranchir des mesures de similarités entre descripteurs souvent difficiles à obtenir dans les entreprises. L'approche est à deux niveaux : une recherche conceptuelle permettant de rechercher des solutions correspondant à des systèmes sémantiquement proches de celui recherché ; une recherche détaillée dans laquelle les solutions de la base d'expérience sont confrontées aux exigences systèmes et aux préférences du concepteur. Ce travail a été abordé dans la thèse de Joël Abeille, dans le projet ANR ATLAS et a été publié dans [textcolorblue\[Kamsu-Foguem et al., 2008\] \(A.4\)](#) pour la contribution en résolution de problèmes et dans [\[Romero et al., 2014\] \(A.1\)](#) pour la contribution en conception de systèmes. Ce travail a été également décrit dans [\[Coudert and Kamsu-Foguem, 2008\] \(C.7\)](#), [\[Coudert et al., 2011b\] \(B.7\)](#), [\[Coudert et al., 2012\] \(B.2\)](#).

Enfin, le troisième volet a permis de formaliser des connaissances contextuelles dont l'exploitation est guidée par les expériences passées. Ces connaissances contextuelles sont modélisées par des contraintes contextuelles au sein d'un problème de satisfaction de contraintes. Une contrainte contextuelle comporte des paramètres dont la valeur (ou le domaine) dépend du contexte dans lequel la contrainte est exploitée. Ainsi, à partir de la caractérisation du contexte dans lequel le processus d'ingénierie système doit être mis en œuvre (à l'aide de couples (*variable, valeur*)), un algorithme permet de rechercher des cas s'étant déroulés en contexte similaire. A partir de ces cas, des valeurs de paramètres sont identifiées et les contraintes contextuelles sont réglées ou précisées selon le contexte. Un outil de filtrage est utilisé afin de restreindre les domaines des variables impliquées dans les contraintes et fournir ainsi une aide à la décision en restreignant l'univers des solutions possibles. Ces travaux ont été mis en œuvre en maintenance d'hélicoptères dans le cadre du projet FUI Hélimaintenance et dans

la thèse d'Aurélien Codet De Boisse (PhD.3) que j'ai coencadrée avec le laboratoire CGI de l'École des Mines d'Albi. La problématique consistait à fournir une aide à la décision aux planificateurs d'activités de maintenance sur des hélicoptères. La durée et le type d'intervention dépendant fortement du contexte d'exploitation des hélicoptères, des contraintes contextuelles ont permis de formaliser des connaissances contextuelles. La caractérisation d'un contexte d'exploitation d'un hélicoptère à maintenir permet de déterminer plus précisément les durées d'immobilisation à proposer aux clients. Ces travaux ont été abordés dans [Vareilles et al., 2012a] (A.2), [Codet De Boisse et al., 2010] (C.3), [Codet De Boisse et al., 2011b] (C.2), [Codet De Boisse et al., 2011a] (C.1).

Ainsi, dans ce chapitre, les outils d'aide à la décision permettent de guider les acteurs du processus d'ingénierie système ou de processus voisins comme la résolution de problèmes, qui intervient dans l'activité de support, ou la planification de projets, qui intervient parallèlement au processus d'ingénierie système. L'aide à la décision est réalisée systématiquement par des outils qui exploitent soit des connaissances métier, soit des expériences guidées par les connaissances métier, soit des connaissances contextuelles guidées par les expériences capitalisées. Les apports principaux concernent l'intégration de techniques de RàPC avec des techniques de problèmes de satisfaction de contraintes ainsi que la modification de l'activité de réutilisation du RàPC afin d'être plus flexible et facile à mettre en œuvre par l'utilisateur qui peut y intégrer ses préférences et raisonner à un niveau conceptuel. Quel que soit le processus de l'ingénierie système concerné, la possibilité de s'aider des expériences passées est primordiale, ne serait-ce que pour ne pas réitérer les erreurs du passé. Nos activités de recherche sur l'amélioration des processus de résolution de problèmes nécessitent de développer de telles approches. Il n'est bien souvent pas envisageable de lancer un processus de RàPC en débutant par la caractérisation du problème sous forme de descripteurs et leur valeur attendue. Le processus de RàPC doit être parfaitement intégré aux processus auxquels il vient en aide et la recherche de cas similaires doit être la plus aisée possible pour le décideur. L'exploitation de connaissances métiers pour cela semble une voie primordiale qui a été investiguée dans ces travaux.

Le **chapitre 5** synthétise les travaux réalisés dans la thèse de Juan Romero en partenariat avec l'entreprise AXSENS-BTE située à Toulouse et spécialisée dans le conseil aux entreprises notamment dans les chaînes logistiques. Ce travail a contribué au niveau *Processus* en permettant d'étendre un processus de résolution de problèmes standard et centralisé vers un processus distribué dans le cadre d'une chaîne logistique. Les processus standards tels 8D, DMAICS, PDCA, etc. sont des processus clé de la qualité. Ils sont arrivés à un niveau suffisamment mature pour que la plupart des entreprises les adoptent. Hors, dans le cadre des chaînes logistiques, ce processus n'est pas centralisé mais distribué car l'analyse des causes d'un problème peut se dérouler chez des partenaires de la chaîne logistiques autres que celui ayant détecté le problème. Les solutions peuvent également être mises en œuvre chez d'autres partenaires et un suivi de l'efficacité doit pouvoir être réalisé sur toute la chaîne de causes et d'effets. Un tel processus, guidé par un arbre des causes, a été proposé dans ces travaux. Un modèle à deux niveaux permettant de fédérer les connaissances et/ou informations nécessaires à la résolution distribuée a été formalisé : le premier niveau (*Technical Breakdown Structure - TBS*) permet de représenter la structure de la chaîne logistique dans un graphe fédérant les informations sur les systèmes, les processus, les transports, la conception, etc. Le second niveau (*Collaborative Breakdown Structure - CBS*) permet de fédérer des informations sur les partenaires de la chaîne et la manière dont ils sont en mesure de collaborer vers l'atteinte d'un objectif commun d'éradication des causes de problèmes. Basés sur ces modèles, des outils d'aide à la décision ont été proposés. Un outil permettant de filtrer les informations

selon le problème, les éléments de systèmes impactés par le problème et le contexte dans lequel le problème est apparu permet de mieux cibler les informations pertinentes et leur détenteur. Un second outil permet d'aider à constituer des équipes de résolution de problèmes efficaces non seulement selon leurs compétences ou leur « proximité » par rapport au problème et à ses causes, mais également en fonction de la manière dont ils ont pu collaborer par le passé. Ainsi, le retour d'expérience est exploité afin de constituer les équipes de partenaires de la chaîne selon des critères liés à leur aptitude à collaborer, mesurés lors de précédentes résolutions. Des critères subjectifs comme la préférence ou la confiance en un partenaire ont ainsi pu être utilisés. Ce travail est décrit dans la thèse de Juan Romero et a été publié dans [Romero et al., 2012b] (B.5), [Romero et al., 2012a] (B.4). Chacun a reçu un prix de type « Best Paper award ».

L'ensemble de ces travaux a permis de développer des partenariats avec des personnes et des structures extérieures au LGP et diversifier ainsi ma culture scientifique. Tout d'abord, mon premier poste de maître de conférences à l'Université de Bretagne Sud à Lorient m'a permis de voir un autre aspect de la recherche plus tourné vers les systèmes à événements discrets, leur commande par graphes et leur reconfiguration mais également vers les architectures électroniques permettant leur exploitation. Ces trois premières années m'ont permis de découvrir une facette différente et de développer d'autres connaissances, notamment en conception de systèmes.

Ensuite, au LGP, les travaux réalisés autour du projet ANR ATLAS et de la thèse de Joël Abeille ou du projet FUI Hélimaintenance et de la thèse d'Aurélien Codet De Boisse m'ont permis de développer des axes de travail intéressants avec le laboratoire CGI de l'Ecole des Mines d'Albi. La collaboration avec Elise Vareilles et Michel Aldanondo entre 2008 et aujourd'hui m'a permis de développer ma culture scientifique dans le domaine des problèmes de satisfaction de contraintes et de l'aide à la décision. D'un point de vue humain, la confrontation à des points de vues et des méthodes de travail différents est très enrichissante. D'un point de vue scientifique, l'association du raisonnement à partir de cas et des problèmes de satisfaction de contraintes grâce à la collaboration de nos deux équipes est un atout majeur qui devrait se prolonger dans d'autres projets.

Enfin, le partenariat avec l'entreprise AXSENS-BTE depuis 2010 est une opportunité essentielle dans mon activité de recherche. Leur parfaite connaissance des problématiques industrielles « de terrain » et leur ouverture d'esprit en font des partenaires de premier rang capables de nous amener des problématiques à la fois réelles, pertinentes et passionnantes. L'embauche de Juan Romero comme responsable du pôle recherche et développement dans cette entreprise permet d'envisager de futures collaborations, essentielles dans mon travail de recherche (voir section suivante).

6.2 Projet de recherche

6.2.1 Les projets en cours

Actuellement, je participe à deux projets de recherche qui sont en cours de réalisation. Le premier est le projet FUI 2PI-MCO qui a débuté en décembre 2013 et doit se poursuivre jusqu'en juillet 2016. Le second est le projet RA-ACO (Risk Assessment by Ant Colony Optimization), un projet de recherche interne au LGP sur l'optimisation multicritère en planification de projets d'ingénierie système en intégrant la dimension *risque*.

Dans le **projet FUI 2PI-MCO**, la problématique abordée concerne l'aide à la décision en réponse à appel d'offre en conception de systèmes. Nous travaillons dans ce projet en partenariat avec l'entreprise AES située à Bordeaux (33) et spécialisée dans la conception et la mise en œuvre de la partie commande de grues portuaires. Un second partenaire est l'entreprise Algotech, située à Bidart (64), qui développe et distribue un logiciel spécialisé dans le câblage électrique. L'entreprise AES souhaite améliorer ses méthodes de réponses à appels d'offre afin d'être plus efficace et performante face à la concurrence mondiale. Nous leur proposons donc d'intégrer dans leur processus des outils d'aide à la décision leur permettant :

- de formaliser des connaissances métier exploitables en phase de réponse à appel d'offre,
- de réutiliser leurs acquis de conception afin de ne pas devoir réitérer systématiquement des activités similaires (expériences et connaissances métier),
- d'évaluer leur processus de réponse à appel d'offre dans une démarche de retour d'expérience.

Ce projet permet de mettre en œuvre des modèles de réutilisation d'acquis développés en amont mais également de développer de nouvelles approches qui s'insèrent dans un processus de réponse à appel d'offre (processus venant en amont de l'activité de définition du système). L'opportunité d'être confrontés à une problématique industrielle nécessitant des résultats opérationnels est des plus importante et permet de progresser en restant conscients des besoins réels sur le terrain. Eric Villeneuve (Post-Doc.1), post-doctorant recruté spécifiquement, travaille sur ce projet sous ma co-responsabilité (avec Laurent Geneste) depuis décembre 2013 pour une durée de 24 mois.

Le projet RA-ACO concerne l'évaluation du risque en sélection de scénarios de projets d'ingénierie système. Pablo Baroso (M2R.5), étudiant Argentin réalisant un semestre de recherche au LGP, travaille sous ma responsabilité. La problématique consiste à poursuivre le travail développé par Paul Pitiot en optimisation de la sélection de scénarios (voir chapitre 2) en intégrant l'évaluation des risques liés aux scénarios, au plus tôt dans un processus d'ingénierie système. Dans ces travaux, de multiples algorithmes de fourmis sont utilisés pour réaliser une sélection de scénarios optimisée selon les critères de coûts, de temps de cycle mais également de risque. Partant d'un graphe de projet tel que défini dans le chapitre 2 et dans lequel les tâches et leurs contraintes d'antériorité sont représentées, nous considérons qu'à chaque tâche est associée une mesure de risque modélisant une connaissance experte sur le fait qu'un événement aux effets indésirables peut survenir durant la réalisation de cette tâche. L'optimisation multicritère permet de rechercher des scénarios optimaux selon les critères de coût total, de temps de cycle total et le risque global. La représentation par un front de Pareto tridimensionnel des solutions optimales et non dominées permet au décideur d'évaluer quel est le risque associé à ses choix de scénarios.

6.2.2 Développement de mon projet de recherche

De manière globale, les activités que je souhaite mener durant les années à venir concernent l'aide à la décision en ingénierie système. Le modèle à trois niveaux (*Processus, Outils, Expériences/ Connaissances*) défini dans cette habilitation pour caractériser la problématique globale de recherche que j'ai traitée depuis 2001 constitue également une base solide pour continuer à cadrer mes futures activités de recherche. Quels que soient les processus encadrant l'activité d'ingénierie système, il est primordial pour moi :

- d'améliorer les processus et leurs interactions,
- de définir ou améliorer des outils d'aide à la décision,
- de développer ou améliorer des modèles permettant de capitaliser des expériences et des connaissances afin d'assurer une meilleure exploitation par des outils d'aide à la décision.

Au sein de cette perspective globale, le travail sur la gestion des risques est une voie importante à investiguer. Dans les années à venir, dans un contexte industriel morose où la concurrence est très agressive, les entreprises qui seront en mesure d'évaluer pertinemment et au plus tôt les risques liés à leurs prises de décisions et qui sauront s'associer avec les meilleurs partenaires prendront une longueur d'avance. Dans ce sens, les entreprises qui seront en mesure de traiter plus rapidement et plus efficacement les problèmes intervenant tout au long du processus d'ingénierie système en construisant des consortiums ad hoc gagneront en confiance auprès de leurs clients et partenaires. Elles seront en mesure de mieux maîtriser les risques inhérents à l'occurrence des problèmes. Enfin, la réutilisation d'expériences et de connaissances dans le but de guider les activités des acteurs de l'ingénierie système reste encore à améliorer. De meilleures performances peuvent être attendues d'une entreprise exploitant régulièrement les expériences passées et formalisant des connaissances afin de ne pas répéter les erreurs du passé ou de favoriser les bonnes pratiques dans leur contexte. Grâce au retour d'expérience, une meilleure visibilité des décisions prises doit pouvoir être obtenue et donc, cela peut constituer une manière de maîtriser les risques tout en améliorant les délais de réalisation des activités.

Ainsi, de manière plus précise, les activités de recherche que je souhaite développer dans mon projet durant les prochaines années concernent :

- le développement d'outils d'aide à la décision (optimisation) guidés par les expériences et connaissances pour la gestion des risques en ingénierie système,
- le développement de nouveaux processus de résolution de problèmes plus flexibles et adaptés aux problématiques industrielles (résolution « agile » de problèmes),
- le développement d'une approche d'optimisation de l'association Acteurs/Activités basée sur un retour d'expérience sur les contributions passées,
- le développement de processus et d'outils mieux intégrés et plus performants pour la réutilisation d'acquis en vue d'aider les processus de l'ingénierie système.

Ces quatre thématiques que je souhaite mettre en œuvre dans mon projet de recherche sont détaillées dans les sections suivantes.

6.2.2.1 L'aide à la décision pour la gestion des risques en ingénierie système

Dans les années à venir, les entreprises qui sauront efficacement et rapidement évaluer et maîtriser les risques inhérents aux prises de décisions prendront une longueur d'avance. Selon les travaux réalisés par Paul Pitiot dans sa thèse, disposer au plus tôt d'un modèle de type graphe de projet fédérant les tâches et les alternatives possibles permet d'envisager de mettre en œuvre des outils d'optimisation afin de guider les choix vers des solutions optimales. Des approches permettant d'optimiser en tenant compte de la minimisation du risque global méritent d'être étudiées. La maîtrise du risque consiste alors à optimiser en tenant compte de cette dimension. Ainsi, la problématique globale abordée dans cette thématique consiste à permettre aux décideurs de visualiser un panel de scénarios de projets Pareto optimaux dont l'un des objectifs est la minimisation du risque global. La manière dont j'envisage la prise en compte des risques en ingénierie syst 'eme consiste à exploiter, dans une démarche d'optimisation par algorithme des fourmis, un graphe de projet avec l'ensemble des tâches réalisables et leurs contraintes de précédence afin de réaliser une sélection de scénarios prenant en compte des objectifs standards tels que la minimisation du coût et du temps de cycle, mais également de minimisation du risque global propre à chaque scénario. Pour chaque tâche, il s'agit de construire, à partir de connaissances expertes et/ou d'un processus de retour d'expérience, un indicateur de risque, représentant la probabilité d'occurrence des problèmes et leur impact. A partir de la construction de ce modèle regroupant les tâches, les choix possibles et le risque inhérent à chaque tâche, il est possible d'évaluer le risque inhérent à des solutions complètes afin de choisir, en connaissance de cause, celle qui sera mise en œuvre dans le projet d'ingénierie système. Le risque associé à une tâche est un indicateur qui caractérise dans quelle mesure un problème peut affecter la réalisation de la tâche par sa fréquence d'occurrence et/ou son impact sur le coût et/ou la durée. Une perspective intéressante est d'utiliser une approche d'optimisation combinatoire par métaheuristique de type algorithme des fourmis. En effet, dans le fonctionnement de cet algorithme, chaque fourmi construit progressivement une solution par simulation, évalue sa performance vis-à-vis des objectifs et, selon cette performance, guide les autres fourmis vers cette solution ou de nouvelles solutions meilleures au sens de Pareto. L'idée principale est d'exploiter un modèle de connaissances représentant le risque inhérent à chaque tâche et l'influence des choix sur les modifications de ce risque afin de guider l'algorithme des fourmis. Un risque associé à une tâche peut varier en fonction des choix précédents ou de l' occurrence de certains événements périphériques au projet. Certains choix peuvent donc influencer le risque de prendre des décisions ultérieures. Ainsi, la construction d'une solution est une expérience particulière qui, selon le risque associé à chaque tâche, peut amener à modifier le risque global lié à la solution. La manière envisagée pour évaluer les risques est de construire un panel de solutions Pareto optimales à l'aide d'un algorithme de fourmis multicritère dont l'un des objectifs est la minimisation du risque global lié à un scénario.

Les activités à réaliser pour traiter cette problématique, telles que je les envisage, sont les suivantes :

1. caractériser les interactions nécessaires entre le processus de gestion des risques et le processus d'ingénierie système à partir des standards existants,
2. développer un modèle à base de graphe fédérant les tâches à réaliser pour fournir un type de système à un client. Un graphe de projet doit être construit pour chaque nouveau projet à développer. La construction de ce graphe peut être réalisée en exploitant, par un processus de retour d'expérience, des graphes précédemment utilisés, voire mis en œuvre, en les adaptant. Ces graphes ayant déjà servi pour l'optimisation, les « fortes » traces de phéromones laissées par les fourmis indiquant les solutions les plus intéressantes vis-à-vis des objectifs peuvent être réutilisées, en les

adaptant, afin d'accélérer l'optimisation courante. L'adaptation doit permettre de rajouter / supprimer des tâches, modifier des durées et des coûts, changer des séquences, etc. Les modalités de réutilisation et d'adaptation de ces graphes doivent ainsi être définies,

3. construire un modèle de connaissances décisionnelles permettant de représenter, à partir du graphe de projet, les choix possibles et leur influence sur le risque local associé à chaque tâche située en aval de ce choix. L'utilisation de réseaux bayésiens ou évidentiels [Smets, 1993] est une approche qui a été explorée pour représenter la propagation des probabilités d'occurrences de problèmes. En revanche, la propagation de leur impact n'a pas été, à ma connaissance, traitée dans la littérature. Une fourmi dispose d'une instance de cette connaissance décisionnelle qui lui permet d'être guidée dans ses choix (choix aléatoires biaisés). Chacun de ses choix dépend de l'attractivité de la tâche située en aval et du chemin emprunté selon les objectifs standards de minimisation du coût et du temps de cycle mais également de minimisation du risque global. En réalisant un choix aléatoire dans le graphe de projet, une fourmi, par inférence dans le modèle de connaissances décisionnelles, modifie le risque inhérent aux tâches situées en aval,
4. développer un algorithme d'apprentissage permettant, à partir d'expériences de mise en œuvre de scénarios, de mettre à jour les connaissances décisionnelles, c'est-à-dire, de modifier les risques inhérents à chaque tâche selon les choix réalisés et la manière dont les tâches se sont déroulées lors de la mise en œuvre du scénario,
5. modifier un algorithme des fourmis multicritère afin de prendre en compte le risque dans l'optimisation. Le risque peut être considéré comme un objectif comme les autres et un algorithme multicritère standard peut être utilisé. Cependant, il est nécessaire de définir un opérateur permettant de construire, par agrégation, une mesure du risque global inhérent à un chemin à partir des risques locaux propres à chaque tâche dans un scénario,
6. modifier l'algorithme standard des fourmis afin de prendre en compte des chemins parallèles dans le graphe de projet (nœuds ET, cf. Chapitre 2). Les algorithmes des fourmis ne prenant pas en compte les branches parallèles dans le graphe, il est nécessaire de les adapter afin qu'à l'apparition d'un nœud ET, une fourmi puisse être « clonée », chaque clone explorant sa propre branche et confrontant ses résultats avec les autres clones lors de la convergence,
7. modifier l'algorithme des fourmis afin de construire un front de Pareto réparti dans l'espace des objectifs (diversité des solutions du front de Pareto). Il est en effet nécessaire pour les décideurs de disposer d'un panel de solutions suffisamment large pour pouvoir évaluer le risque inhérent aux décisions optimales. Pour cela, un algorithme basé sur de multiples colonies de fourmis cherchant à atteindre des buts particuliers dans l'espace des objectifs peut s'avérer être une solution intéressante. Chaque colonie est associée à un but. Chaque fourmi au sein d'une colonie cherche alors à minimiser l'écart entre ses propres performances et le but (vis-à-vis des objectifs),
8. développer une plate-forme de tests afin de mener des expérimentations et valider les approches proposées.

L'optimisation multicritère, dont l'un des objectifs est de minimiser le risque global construit selon les choix liés à la solution ainsi qu'à partir de connaissances issues du retour d'expérience et capitalisées dans un modèle ad hoc, est une piste d'investigation prometteuse et originale. Les travaux réalisés par Pablo Baroso (M2R.5) lors de son semestre de recherche constituent la première étape contribuant à cette thématique. Une des applications possible de cette approche est l'évaluation du risque en phase de réponse à appels d'offre. Ce processus est mis en œuvre dès les premières phases de l'ingénierie

système. Pour beaucoup d'entreprises, une part importante des solutions existantes et déjà mises en œuvre dans de précédents projets sont réutilisées au moment de construire la réponse à appel d'offre qui doit s'avérer être la plus exhaustive et fiable possible. Il s'agit donc de formaliser un graphe de projet représentant les choix possibles et les tâches de développement et de réalisation avec leur durée et leur coût. Un modèle de connaissances décisionnelles permettant de capitaliser sur les risques et la manière dont ils sont modifiés par les choix permettrait ensuite de guider les fourmis afin de rechercher un panel de solutions Pareto optimales avec le risque associé. Cela permettrait ainsi aux décideurs de fournir des réponses à appels d'offre en tenant compte du risque inhérent aux solutions proposées. Ce risque pourrait ensuite être couplé au risque de refus de la réponse par le client. Si ce risque est jugé acceptable, on évalue alors le risque de ne pas maîtriser les délais et les coûts.

De plus, la thématique de l'aide à la décision en phase de réponse à appel d'offre traitée au laboratoire LGP [Botero et al., 2013] intéresse également le laboratoire CGI de l'Ecole des Mines d'Albi. Des projets de recherche communs sont donc à envisager dans ce sens. Une approche développée au laboratoire CGI en configuration de produits est basée sur l'hybridation d'un problème de satisfaction de contraintes avec un algorithme évolutionnaire [Pitiot et al., 2014]. Cette approche peut également être mise en relation avec notre algorithme à base de colonies de fourmis intégrant la dimension risque. Un guidage des fourmis dans le graphe représentant les choix possibles en phase de réponse à appel d'offre par des contraintes filtrées constitue une approche intéressante à étudier en commun. Dans ce cadre, un modèle à base de problème de satisfaction de contraintes permettrait de constituer des connaissances métier directement exploitables par l'utilisateur en phase de réponse à appel d'offre et correspondant aux parties de systèmes les plus réutilisées (environ 90 %). La constitution d'un nouveau graphe de projet serait ainsi aidée par un mécanisme de filtrage limitant les possibilités des variables impliquées et donc, des choix possibles dans le graphe. De plus, des contraintes d'activation pourraient permettre d'activer en aval dans le graphe, selon les choix réalisés en amont, des branches supplémentaires, des tâches supplémentaires ou, au contraire, d'en inhiber certaines (voir un exemple d'application dans [Djefel, 2010]). Ainsi, un tel modèle de connaissances métier permettrait de configurer le graphe de projet selon les besoins identifiés pour le nouveau système à développer à partir des 90 % d'éléments réutilisés.

Nous l'avons détaillé dans le chapitre 2, les méthodes d'optimisation que nous développons permettent de ne réaliser qu'une sélection de scénarios mais pas de planifier les projets car il manque la dimension ressources. Afin de développer cela, des contraintes permettant de représenter la capacité limitée des ressources pourraient également être utilisées, cette fois en cours d'optimisation par l'algorithme des fourmis. Chaque choix de tâche par une fourmi consommant une part de ressource, un filtrage permettrait d'inhiber certains choix en aval dans le graphe en raison de ressources indisponibles. Des stratégies de répartition des ressources sur les différentes tâches pourraient ainsi être testées et évaluées, toujours en ayant une vision sur l'effet produit sur le risque global lié au projet.

Cette thématique reste pour l'instant positionnée très en amont. Cependant, le domaine d'application de l'aide à la réponse à appels d'offres intéresse les industriels. L'objectif est donc à court terme, de développer des travaux en laboratoire afin de lever certains verrous scientifiques puis, en associant les laboratoires CGI et LGP (voire d'autres laboratoires), de construire des projets de type ANR ou associant la région Midi-Pyrénées en intégrant des partenaires industriels comme utilisateurs finaux des résultats et approches développés.

6.2.2.2 L'amélioration des processus de résolution de problèmes

L'amélioration des processus standards de résolution de problèmes est une voie à étudier. En effet, le choix parmi les standards PDCA, 8D, DMAICS, 7-steps, etc. est souvent réalisée par défaut ou sous l'influence de donneurs d'ordres dans une chaîne logistique. Ce genre de processus, bien qu'efficace, mature et largement répandu dans les industries peut s'avérer assez peu flexible face aux problèmes et aux contextes dans lesquels ils sont déployés. Il est avantageux de disposer de processus plus dynamiques et reconfigurables de manière à s'adapter à des environnements et à des problèmes complexes, distribués et changeants. La problématique que je souhaite investiguer dans ce domaine concerne la définition de nouveaux processus de résolution de problèmes inspirés des méthodes de conception de systèmes dites « agiles » [Haberfellner and De Weck, 2005]. De tels processus peuvent être reconfigurables selon le contexte dans lequel ils sont mis en œuvre. Les activités, les outils, les acteurs impliqués peuvent être modifiés à chaque instant selon le problème traité et l'évolution de sa résolution. Le processus de résolution de problèmes devient dynamique, il s'adapte en permanence à de nouveaux besoins, à l'apparition de nouvelles informations, souvent inattendues. Les besoins auxquels il faut répondre et les solutions mises en œuvre peuvent évoluer à chaque instant au lieu d'être figées dès les premiers résultats d'analyses des causes par exemple. Au fil du temps, les solutions peuvent être complétées suite à l'apparition de nouvelles informations ou connaissances. Ce genre de processus nécessite pour fonctionner de construire des équipes soudées et communicantes plutôt qu'un ensemble d'experts travaillant individuellement à la satisfaction de leurs propres objectifs en suivant rigoureusement les activités définies dans le standard choisi. La méthode est concentrée sur le résultat (le problème résolu et éradiqué) et non pas sur un suivi d'actions définies par le standard de résolution de problèmes. La méthode agile fonctionne en étroite collaboration avec le « client », c'est-à-dire la personne qui subit le problème dans son environnement et qui est intéressée par sa résolution. Celui-ci peut demander continuellement à modifier la manière dont la résolution fournit ses résultats si ceux-ci ne sont pas satisfaisants. Ainsi, il est nécessaire de pouvoir s'adapter en permanence à de nouveaux besoins comme la demande de nouvelles analyses, de nouveaux tests en cherchant à chaque fois à compléter efficacement une équipe qui fonctionne en synergie. Si le problème s'avère être distribué, la méthode doit pouvoir d'adapter également en favorisant l'intégration de personnes supplémentaires à l'équipe de résolution. L'agilité du processus proposé peut être grandement facilitée par la réutilisation et le partage d'expériences et de connaissances. Chaque mise en œuvre du processus agile est une nouvelle expérience qu'il est opportun de capitaliser avec un formalisme adapté de façon à pouvoir la réutiliser le cas échéant. Notamment, il est intéressant d'identifier des contextes types dans lesquels l'agilité est mise en œuvre. L'identification de tels contextes en cours de résolution permet alors, par retour d'expérience, de réutiliser les expériences passées correspondantes. Par exemple, pour la résolution d'un problème, l'analyse des causes permet d'identifier de nouveaux problèmes potentiels. En pareil cas, un processus adapté est mis en œuvre afin d'étudier par exemple le risque inhérent au problème potentiel et de réaliser les activités adéquates. Si une telle situation se reproduit dans un contexte similaire, après adaptation, ce processus pourra être redéployé et mener rapidement à une solution. Nous l'avons abordé dans le chapitre 5, les activités d'ingénierie systèmes concernées par la résolution de problèmes sont principalement celles de production et d'utilisation. Nous avons également précisé que cette portée était très limitée. En effet, quelque soit l'activité du processus d'ingénierie système, lors de l'occurrence de problèmes, le processus de résolution agile doit pouvoir être mis en œuvre et impliquer des acteurs clés de l'entreprise ou de la chaîne logistique.

J'envisage d'encadrer les activités de recherche suivantes pour développer cette problématique :

1. étudier les processus de résolution de problèmes standards et des méthodes de développement agiles. Le but est de d'effectuer un bilan critique des processus de résolution de problèmes standards et de mesurer dans quelle mesure les méthodes agiles peuvent apporter des solutions,
2. définir un modèle de processus agile de résolution de problèmes . Des situations types, dans lesquelles la résolution doit être reconfigurée, peuvent être identifiées et les processus d'adaptation généraux doivent pouvoir être spécifiés. Par exemple, une demande d'analyse d'une situation ou d'un événement suspect supplémentaire doit pouvoir être traitée en mettant en œuvre un sous-processus agile qui permettra de réagir rapidement à la demande,
3. caractériser et développer les outils d'aide à la décision nécessaires pour réaliser la résolution de manière collaborative. Il peut s'agir d'outils de travail collaboratif permettant à des contributeurs de participer, soit de manière libre et volontaire, soit de manière prédéfinie en raison de critères adaptés comme les compétences, la motivation, les connaissances, etc. Il peut s'agir également de tisser des liens étroits entre le « client » et les contributeurs de la résolution. Un tel support doit permettre également de favoriser le partage d'informations, d'expériences et de connaissances afin d'être le plus efficace possible,
4. développer des modèles ad hoc pour les expériences et connaissances ainsi que des outils de réutilisation rapides et efficaces. Il s'agit de faciliter la formalisation des expériences qui doit être relativement transparente pour les acteurs et de définir des mécanismes de réutilisation. Pour les connaissances, il s'agit de formaliser des *patterns d'agilité*, c'est-à-dire des guides concernant les activités à mener selon les évolutions, les modifications souhaitées en cours de résolution,
5. développer des modèles permettant d'évaluer l'efficacité de tels processus en termes de « valeur ajoutée » pour l'entreprise. Le travail collaboratif efficace d'équipes qui ne sont pas nécessairement amenées à travailler ensemble dans leur activité nominale peut également constituer une certaine forme de valeur ajoutée pour l'entreprise. L'identification d'associations efficaces pour une résolution de problèmes dans un contexte particulier peut ensuite être exploitée pour de futures résolutions mais aussi pour développer de nouveaux concepts innovants. En d'autres termes, il s'agit de proposer des modèles qui vont quantifier la contribution des activités d'amélioration continue ou de résolution de problèmes vis-à-vis de l'augmentation des acquis de l'entreprise. Par exemple, cette contribution peut être financière mais la construction de nouvelles expériences et connaissances peut aussi constituer une augmentation du capital immatériel de l'entreprise et donc contribuer à une certaine forme de valeur ajoutée qui mérite d'être prise en compte,
6. appliquer l'approche et les outils dans un cas industriel afin de la valider.

Pour cette thématique, de nouvelles collaborations entre le LGP et l'entreprise AXSENS sont envisagées sous la forme de thèse en contrat CIFRE dans les mois à venir. L'objectif est donc de rester au plus proche des besoins industriels en garantissant l'applicabilité des approches développées tout en garantissant des contributions scientifiques de bon niveau.

6.2.2.3 Optimisation de l'association Acteurs / Activités basée sur le retour d'expérience des contributions

Cette problématique concerne la constitution d'équipes pour la réalisation d'activités en tenant compte d'aspects collaboratifs entre acteurs issus du retour d'expérience. Il s'agit de définir des outils et des modèles permettant de favoriser la réalisation des activités d'ingénierie système en constituant des équipes de contributeurs ad hoc, c'est-à-dire compétents, performants et motivés par les tâches à réaliser et la satisfaction des objectifs. Dans la thèse de Juan Romero [Romero, 2013] (PhD.4), nous avons abordé cette problématique dans le cadre particulier de la résolution de problèmes. La manière dont nous l'avons traitée reste à un niveau global. Des partenaires, c'est-à-dire des entreprises prises dans leur globalité, sont évalués par retour d'expérience pour être intégrés aux activités de résolution (principalement d'analyse). L'approche est descendante dans la mesure où, après avoir sélectionné des partenaires, des acteurs particuliers sont affectés aux activités requises. La limite de cette approche est qu'il est difficile de mesurer efficacement les aptitudes à la collaboration selon des critères de préférences, de compétences ou de proximité par rapport aux activités à réaliser en considérant les entreprises dans leur globalité. La problématique que je souhaite développer consiste en l'étude d'une approche montante dans laquelle on constitue des équipes en considérant chaque acteur individuellement. Que ce soit dans les méthodes de gestion de projet ou d'ordonnancement, l'affectation d'acteurs à la réalisation de tâches est une problématique à part entière. Dans ce genre de problème, on affecte généralement les acteurs selon des modèles représentant leurs compétences. Des associations entre compétences requises et compétences acquises sont réalisées en tentant de minimiser les écarts [Belkadi et al., 2007, Boucher et al., 2007, Houe et al., 2011].

L'activité de recherche que je souhaite développer consiste à adopter un point de vue différent de celui développé dans ces approches afin de prendre en compte des critères plus larges que les compétences (issues du retour d'expérience sur les contributions des acteurs) et plus subjectifs (comme les préférences ou l'effort que chaque acteur est prêt à consentir, par exemple). En effet, outre les compétences des acteurs pour réaliser une activité, d'autres éléments peuvent être pris en compte. Le retour d'expérience et la formalisation de connaissances permettant de favoriser de futures constitutions d'équipes sont à étudier également. Lorsqu'un acteur a été affecté à une activité et que cette activité a été réalisée, il est possible de mesurer l'efficacité de l'acteur vis-à-vis de sa contribution. La nature de la contribution (aide, conseil, développement, rédaction, etc.), l'effort et les résultats qu'il a fournis, les compétences qu'il a mises en œuvre, le rôle qu'il a tenu peuvent constituer un panel d'informations permettant de caractériser une expérience d'association Acteur/Activité. A partir d'un ensemble d'expériences fédérées dans un modèle adapté (un graphe des contributions - figure 6.1), la contribution envisagée est une approche permettant d'optimiser les affectations d'acteurs à un nouvel ensemble d'activités à réaliser selon divers critères. Ces critères peuvent être de minimiser le nombre d'acteurs par activité, optimiser la collaboration, minimiser les conflits, satisfaire les préférences exprimées par les acteurs à propos des activités mais également des autres acteurs affectés. L'objectif est d'obtenir la meilleure association possible d'acteurs pouvant contribuer aux activités requises. La figure 6.1 illustre l'approche envisagée pour l'affectation d'acteurs à la réalisation d'activités en exploitant le retour d'expérience des contributions. L'exploitation du graphe des contributions doit ensuite permettre de caractériser, par des mécanismes d'agrégation et de généralisation, des mesures de collaborativité d'entreprises partenaires (approche montante).

L'outil d'optimisation multicritère que je souhaite développer dans ce travail est basé sur une approche de simulation par système multiagent. Dans la mesure où des acteurs sont impliqués dans le

processus d'affectation, une approche où ces acteurs sont représentés par des agents est une piste intéressante à explorer. La possibilité de modéliser des préférences et d'engager des négociations entre agents pour gérer les conflits peut être exploitée afin de tester, par simulation d'instances virtuelles d'acteurs et d'activités, des scénarios particuliers. Chaque agent modélisant un acteur peut améliorer ses connaissances et guider ses décisions par retour d'expérience en consultant le graphe des contributions.

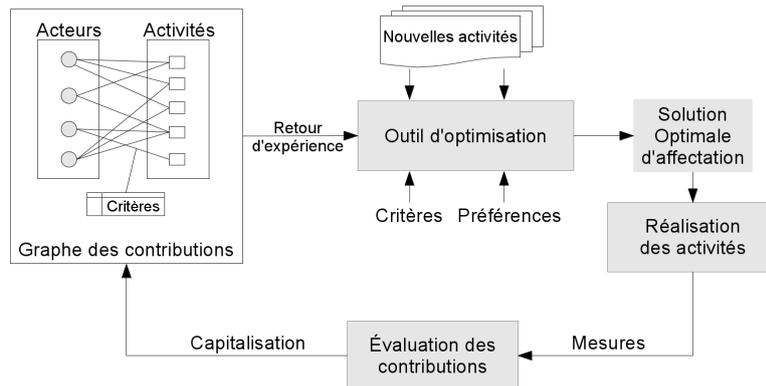


FIGURE 6.1 – Approche envisagée pour l'optimisation de l'affectation d'acteurs à la réalisation d'activités basée sur le retour d'expériences des contributions

Les activités de recherche que j'envisage d'encadrer sont les suivantes :

1. étudier les méthodes d'ordonnancement ou d'affectation d'acteurs à des activités afin de positionner la problématique au regard de la littérature,
2. développer un modèle de graphe des contributions permettant de représenter les expériences d'association d'acteurs avec des activités. Il s'agit de caractériser, à l'aide d'indicateurs pertinents, chaque association Acteur/Activité vis-à-vis de critères qu'il s'agit également de préciser. Les principes de capitalisation des expériences réalisées doivent également être définis (capture des expériences, évaluation des contributions, acteurs impliqués dans l'activité d'évaluation et de capitalisation, etc.),
3. caractériser le problème d'optimisation. Il s'agit de modéliser le problème, de définir les critères d'optimisation, la manière de prendre en compte les préférences et la manière de résoudre le problème,
4. développer ou réutiliser une plate-forme multiagent pour effectuer la recherche d'affectations Acteurs/Activités pertinentes. Il s'agit de caractériser les agents (Acteurs, Activités, Managers, etc.) en définissant leur structure (agent cognitifs) ainsi qu'en spécifiant leur comportement dans un univers multiagent. Les principes du « contract net » peuvent être étudiés afin de réaliser des affectations par un mécanisme d'appel d'offres et d'enchères. Les caractéristiques des messages utilisant des standards tels FIPA-ACL doivent être spécifiés et implémentés,
5. évaluer l'approche par des tests de simulation sur plate-forme multiagent, compléter par des tests grandeur nature simples afin de la valider.

Pour cette thématique, transversale aux deux premières (optimisation et gestion du risque, résolution agile de problèmes), il est également envisagé de travailler en partenariat avec l'entreprise

AXSENS pour laquelle la problématique de la collaboration entre acteurs dans les processus présente un fort intérêt.

6.2.2.4 La réutilisation d'expériences guidée par les connaissances

Il s'agit d'un axe de recherche que je souhaite continuer à développer dans les prochaines années. A mon sens, les processus actuels de Raisonement à Partir de Cas ne sont pas suffisamment bien intégrés aux processus de l'ingénierie système pouvant en bénéficier alors qu'ils sont essentiels. Leur utilisation, le cas échéant, se limite aujourd'hui à la mise en œuvre en parallèle d'un outil dédié et, par conséquent, peut être intégrée. Or, dans les thématiques précédentes, nous voyons que bien souvent, il est utile, voire incontournable, de se baser sur des expériences passées pour aider la réalisation d'activités courantes. Des algorithmes de recherche de cas compatibles plus performants exploitant mieux les concepts fédérés dans une ontologie sont nécessaires. En effet, il est important de continuer à développer des approches flexibles pour la recherche de cas compatibles avec ce que l'on recherche. Les modèles actuels sont relativement rigides dans la mesure où ils nécessitent de définir des variables et des valeurs requises. Nous avons proposé une approche dans laquelle il n'est plus nécessaire de disposer de mesures de similarités entre valeurs de descripteurs (voir chapitre 4), cependant, ces modèles sont difficiles à implémenter dans la réalité. Des modèles plus efficaces, permettant de manière transparente pour l'utilisateur, de créer des requêtes en fonction de l'activité courante seraient bénéfiques. L'exploitation systématique de concepts issus d'une ontologie peut apporter des solutions intéressantes. Des modèles hybridant l'opérateur de projection des graphes conceptuels et des similarités conceptuelles sont à étudier. Il s'agit de construire, en arrière plan et de façon quasi-automatisée, des requêtes afin d'identifier rapidement des expériences compatibles. L'utilisateur se concentre alors sur son activité d'ingénierie sans se préoccuper de devoir bâtir chaque élément de la requête qui lui permettra d'interroger la base d'expériences. Seul un guidage par le choix limité de concepts dans l'ontologie peut lui être demandé. Ainsi, à chaque instant et en fonction de l'activité courante menée et des actions réalisées, il s'agit de construire en temps réel des requêtes, de réaliser la recherche d'expériences compatibles et de renseigner l'utilisateur sur les expériences susceptibles de l'aider à réaliser son activité. L'approche peut être incrémentale. Le choix d'un concept dans l'ontologie doit permettre d'identifier et de montrer à l'utilisateur des concepts proches soit sémantiquement proches dans l'ontologie, soit structurellement proches dans des expériences précédentes. Des ensembles de concepts types peuvent être prédéfinis, à des niveaux plus ou moins spécialisés afin de réaliser cela. Par exemple, en cours de réalisation de l'activité de développement architectural et en fonction des besoins qui ont été identifiés, plusieurs ensembles de concepts correspondant à des architectures requêtes types peuvent être proposées à l'utilisateur. Cette requête peut être progressivement affinée en proposant de spécialiser certains concepts. En temps masqué et selon les orientations données par l'utilisateur, des expériences compatibles peuvent être identifiées dans la base d'expérience et proposées. Ainsi, la formalisation des expériences et leur référencement par des ensembles de concepts qui en faciliteront la réutilisation et l'adaptation méritent d'être étudiés plus profondément. Les applications sont multiples et nos partenaires industriels expriment le besoin de définir de tels modèles favorisant la réutilisation ainsi que d'outils opérationnels et intégrés à leurs propres processus. Les activités de recherche dont j'envisage l'encadrement sont les suivantes :

1. élaborer un modèle d'expérience composé de deux vues : i) une vue informationnelle permettant de capitaliser au fil du temps toutes les informations concernant l'expérience sur l'activité en cours de réalisation, ii) une vue conceptuelle permettant, à partir de concepts de l'ontologie,

« d'étiqueter » l'expérience, c'est-à-dire de permettre sa modélisation à un niveau conceptuel. La vue conceptuelle peut être vue comme une liste de « concepts clés » issus de l'ontologie et servant à représenter au mieux l'expérience. Les concepts clés peuvent concerner par exemple la nature de l'activité, le(s) système(s) concerné(s), les outils d'aide utilisés, etc.,

2. élaborer un modèle de connaissances permettant de constituer des ensembles de concepts en fonction des activités réalisées,
3. développer une méthode fonctionnant en « temps masqué » et permettant, à partir de la suggestion d'un concept (voire de plusieurs concepts) lié(s) à l'activité en cours de réalisation, d'identifier les concepts sémantiquement (ontologie) et structurellement (base d'expériences) proches,
4. développer une méthode permettant, à partir de concepts sélectionnés, de rechercher des expériences compatibles,
5. développer une plate-forme de suivi de projet d'ingénierie système (couplée à un outil de planification) permettant de suivre le déroulement des tâches et de suggérer en temps réel des ensembles de concepts clés à l'utilisateur, de lancer une recherche de concepts proches puis de lancer une recherche de cas compatibles et de les indiquer à l'utilisateur. L'accent doit être mis sur l'ergonomie et l'intégration.

La figure 6.2 illustre le processus d'aide à la décision envisagé.

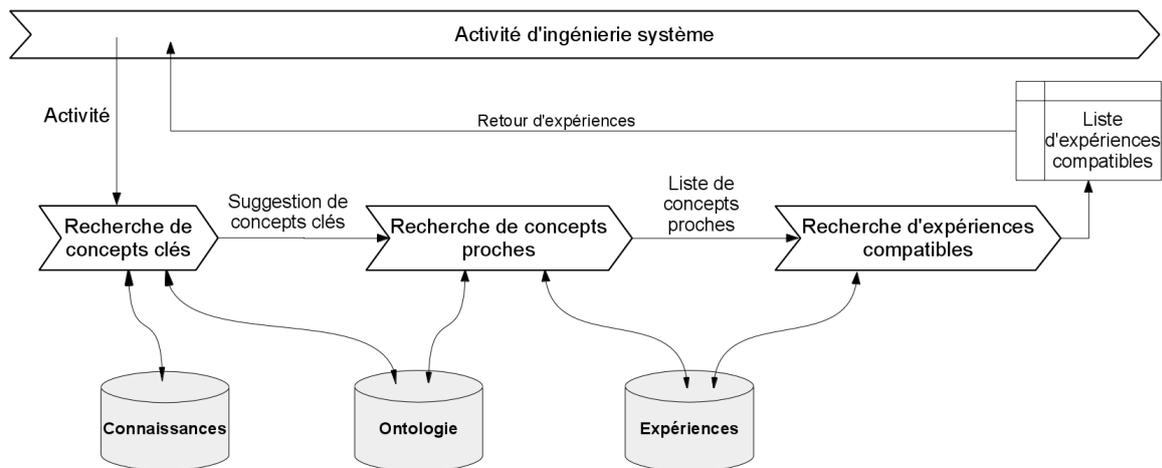


FIGURE 6.2 – Approche envisagée pour la recherche d'expériences compatibles

6.2.3 Conclusion sur mon projet de recherche

Dans la continuité des activités menées depuis 2001 et cadrées par le modèle *Processus, Outils, Expériences/Connaissances*, mon projet de recherche est basé sur l'amélioration de l'aide à la décision exploitant des connaissances au sein des processus d'ingénierie système. Dans les entreprises, l'aide à la décision en ingénierie système est aujourd'hui favorisée par des outils opérationnels (CAO, PLM, planification de projets, etc.). Des outils issus de l'ingénierie des connaissances (retour d'expériences, raisonnement à partir de cas, contraintes, ontologies, etc.) permettent d'exploiter des expériences et des connaissances afin de gagner en performance, efficacité et visibilité lors des prises de décisions. Le projet de recherche que je souhaite développer consiste à mieux intégrer l'ingénierie système et l'ingénierie des connaissances. Dans les années à venir, la performance des entreprises sera obtenue non seulement par la maîtrise et l'intégration des outils opérationnels métiers (par exemple grâce au PLM), mais aussi par la maîtrise et l'intégration d'outils opérationnels d'ingénierie des connaissances. Etre capable de développer rapidement de nouveaux systèmes innovants ne sera plus suffisant, il faudra également maîtriser les processus par une exploitation pertinente, systématique et parfaitement intégrée des expériences et des connaissances, à chaque étape du processus d'ingénierie système. Ce n'est que dans ce cadre que les entreprises pourront mesurer, évaluer et maîtriser efficacement et rapidement les risques au sein de leurs projets d'ingénierie système. C'est donc dans cette logique que j'ai construit mon projet de recherche. Selon moi, un tel projet est une activité qui se construit dans le temps. Tout n'est pas figé mais va évoluer au grès des nouveaux partenariats académiques ou industriels, des rencontres humaines et de la synergie qui s'en dégagera. J'ai construit mon projet dans cette optique. Au regard des activités que j'ai réalisées, des connaissances et de l'expérience acquises, j'ai détaillé quatre thématiques que j'envisage d'explorer et qui sont fédérées par le modèle *Processus, Outils, Expériences/Connaissances*. La définition des quatre thématiques (voir section précédente) constitue une première étape. Chacune constituera une brique élémentaire participant au projet global d'intégration. Ces thématiques sont développées à un niveau global mais, également, à un niveau plus détaillé afin de montrer comment je prévois le séquençage et l'encadrement de leur réalisation future ainsi que les partenariats envisagés. Ces thématiques évolueront, s'enrichiront d'autres éléments, leur étude dégagera d'autres problématiques, mais le cadre posé en conclusion de cette habilitation à diriger des recherches permettra de guider mon activité durant les années futures. La problématique de l'aide à la décision en ingénierie système en intégrant l'ingénierie des connaissances constitue, selon moi, un axe de recherche passionnant et qui nécessitera encore de nombreuses années d'investigations, sans doute en intégrant d'autres disciplines comme par exemple les sciences sociales ou encore les sciences économiques.

Bibliographie

- [Aamodt and Plaza, 1994] Aamodt, A. and Plaza, E. (1994). Case-based reasoning : Foundational issues, methodological variations and system approaches. *AI Communications*, 7(1) :39–52.
- [Abeille, 2011] Abeille, J. (2011). *Vers un couplage des processus de conception de systèmes et de planification de projets : formalisation de connaissances méthodologiques et de connaissances métier*. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Toulouse.
- [Abeille et al., 2010] Abeille, J., Coudert, T., Vareilles, E., Geneste, L., Aldanondo, M., and Roux, T. (2010). Formalization of an integrated system/project design framework : First models and processes. In Aiguier, M., Bretaudeau, F., and Krob, D., editors, *Proceedings of CSDM2010*, pages 207–217. Springer.
- [Abeille et al., 2009] Abeille, J., Goris, G., Vareilles, E., Roux, T., Aldanondo, M., and T., C. (2009). Couplage de la conception de produit et de la planification de projet : Première analyse des pratiques industrielles. In *Actes de la Conférence Internationale de Génie Industriel - CIGI'09*.
- [Agrawal et al., 1993] Agrawal, R., Imieliński, T., and Swami, A. (1993). Mining association rules between sets of items in large databases. *SIGMOD Rec.*, 22(2) :207–216.
- [AIAG, 2012] AIAG (2012). *Effective Problem Solving Practitioner Guide*. Automotive Industry Action Group.
- [Aldanondo et al., 2011] Aldanondo, M., Abeille, J., Coudert, T., Vareilles, E., and Geneste, L. (2011). Vers une identification des interactions conception de système et gestion de conception. *Revue d'Ingénierie Numérique Collaborative - Revue électronique*, CPI09(3).
- [Amagbegnon et al., 1995] Amagbegnon, T., Le Guernic, P., Marchand, H., and Rutten, E. (1995). Signal - the specification of a generic, verified production cell controller. In Lewerentz, C. and Lindner, T., editors, *Formal Development of Reactive Systems-Case Study Production Cell*, pages 113–129. Springer, Berlin,.
- [Apics, 2014] Apics (2014). Apics dictionary, the american production and inventory control society, inc., edition no. 14.
- [Avramenko and Kraslawski, 2006] Avramenko, Y. and Kraslawski, A. (2006). Similarity concept for case-based design in process engineering. *Computers & Chemical Engineering*, 30(3) :548–557.
- [Balarin et al., 1997] Balarin, F., Giusto, P., Jurecska, Y., Passerone, C., Sentovich, E., Tabbara, B., Chiodo, M., Hsieh, H., Lavagno, L., Sangiovanni-Vincentelli, A., and Suzuki, K. (1997). *Hardware-Software Co-Design of Embedded Systems, The POLIS Approach*. Kluwer Academic Publishers.
- [Baron et al., 2004] Baron, C., Rochet, S., and Esteve, D. (2004). Gesos : A multi-objective genetic tool for project management considering technical and non-technical constraints. In *AIAI*, pages 329–342.

- [Batet et al., 2011] Batet, M., Sánchez, D., and Valls, A. (2011). An ontology-based measure to compute semantic similarity in biomedicine. *Journal of Biomedical Informatics*, 44(1) :118–125.
- [Becerra and Coello-Coello, 2005] Becerra, R. and Coello-Coello, C. (2005). Optimization with constraints using a cultured differential evolution approach. In *GECCO*, pages 27–34.
- [Behrens et al., 2007] Behrens, B., Wilde, I., and Hoffmann, M. (2007). Complaint management using the extended 8d-method along the automotive supply chain. *Production Engineering*, 1(1) :91–95.
- [Belkadi et al., 2007] Belkadi, F., Bonjour, E., and Dulmet, M. (2007). Competency characterisation by means of work situation modelling. *COMPUTERS IN INDUSTRY*, 58(2) :164–178.
- [Benferhat et al., 2006] Benferhat, S., Dubois, D., Kaci, S., and Prade, H. (2006). Bipolar possibility theory in preference modeling : Representation, fusion and optimal solutions. *Information Fusion*, 7(1) :135–150.
- [Bergmann, 2002] Bergmann, R. (2002). *Experience Management : Foundations, Development Methodology, and Internet-Based Applications*. Springer, Berlin.
- [Berruet et al., 2004] Berruet, P., Coudert, T., and Kindler, E. (2004). Vers une simulation réflexive en ingénierie des systèmes transitiqes. In *Actes de la cinquième conférence francophone de Modélisation et SIMulation - MOSIM'04*.
- [Berruet et al., 2000] Berruet, P., Toguyeni, A., Elkhatabi, S., and Craye, E. (2000). Toward an implementation of recovery procedures for flexible manufacturing systems supervision. *Computers in Industry*, 43(3) :227 – 236.
- [Bertin, 2012] Bertin, A. (2012). *Intégration d'un système de Retour d'Expériences à un PLM*. PhD thesis, INP Toulouse, Ecole Doctorale Systèmes.
- [Bessiere, 1994] Bessiere, C. (1994). Arc-consistency and arc-consistency again. *Artificial intelligence*, 65(1) :179–190.
- [Boitte, 2009] Boitte, C. (2009). Étude d'un module de réutilisation de cas dans le contexte du projet rntl atlas.
- [Borsato, 2014] Borsato, M. (2014). Bridging the gap between product lifecycle management and sustainability in manufacturing through ontology building. *Computers in Industry*, 65(2) :258 – 269.
- [Botero et al., 2013] Botero, J., Béler, C., and Noyes, D. (2013). Risk analysis in project early phase taking into account the product lifecycle : Towards a generic risk typology for bidding process. In *7th IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management, and Control, 2013*, pages pp. 495–500.
- [Botta-Genoulaz et al., 2010] Botta-Genoulaz, V., Campagne, J., Llerena, D., and Pellegrin, C. (2010). *Supply Chain Performance Collaboration, Alignment and Coordination*. Wiley.
- [Boucher et al., 2007] Boucher, X., Bonjour, E., and Grabot, B. (2007). Formalisation and use of competencies for industrial performance optimisation : A survey. *Computers in Industry*, 58(2) :98–117.
- [Boussaïd et al., 2013] Boussaïd, I., Lepagnot, J., and Siarry, P. (2013). A survey on optimization metaheuristics. *Information Sciences*, 237(0) :82 – 117. Prediction, Control and Diagnosis using Advanced Neural Computations.

-
- [Brandt et al., 2008] Brandt, S., Morbach, J., Miatidis, M., Theißen, M., Jarke, M., and Marquardt, W. (2008). An ontology-based approach to knowledge management in design processes. *Computers & Chemical Engineering*, 32(1-2) :320–342.
- [Brézillon, 1999] Brézillon, P. (1999). Context in problem solving : a survey. *The Knowledge Engineering Review*, 14(01) :47–80.
- [Brézillon, 2007] Brézillon, P. (2007). Context modeling : Task model and practice model. In *Modeling and Using Context*, pages 122–135. Springer.
- [Béler, 2008] Béler, C. (2008). *Modélisation générique d’un retour d’expériences cognitif : Application à la prévention des risques*. PhD thesis, INP Toulouse, Ecole Doctorale Systèmes.
- [Cao et al., 2011] Cao, D., Li, Z., and Ramani, K. (2011). Ontology-based customer preference modeling for concept generation. *Advanced Engineering Informatics*, 25(2) :162–176.
- [Chang et al., 2008] Chang, X., Sahin, A., and Terpeny, J. (2008). An ontology-based support for product conceptual design. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 24(6) :755–762.
- [Chein, 1998] Chein, M. (1998). Nested graphs : A graph-based knowledge representation model with fol semantics. In *Proceedings of the 6th International Conference on Knowledge Representation (KR’98)*, pages 524–534. Morgan Kaufmann.
- [Chein and Mugnier, 1992] Chein, M. and Mugnier, M. (1992). Conceptual graphs : fundamental notions. *Revue d’Intelligence Artificielle*, 6 :365–406.
- [Chen et al., 2003] Chen, S., Ling, S., and Chen, W. (2003). Project scheduling for collaborative product development using {DSM}. *International Journal of Project Management*, 21(4) :291 – 299.
- [China, 1997] China, M. (1997). *Connaissance et savoir-faire en entreprise, intégration et capitalisation*. Hermès.
- [Clermont et al., 2007] Clermont, P., Béler, C., Rakoto, H., Desforges, X., and Geneste, L. (2007). Capitalisation et exploitation du retour d’expérience : un raisonnement à partir de cas étendu aux systèmes sociotechniques. *Hermès*.
- [Codet De Boisse, 2013] Codet De Boisse, A. (2013). *Aide à la décision en maintenance d’hélicoptères civils par l’exploitation de connaissances capitalisées : couplage des approches CSP et CBR*. PhD thesis, INP Toulouse, Ecole Doctorale Systèmes.
- [Codet De Boisse et al., 2011a] Codet De Boisse, A., Vareilles, E., Coudert, T., Gaborit, P., Aldanondo, M., and Geneste, L. (2011a). Couplage des approches par analogie et par contraintes : spécifications d’un outil d’aide à la décision en maintenance d’hélicoptères. In *19ème atelier Français de Raisonnement à Partir de Cas*.
- [Codet De Boisse et al., 2011b] Codet De Boisse, A., Vareilles, E., Coudert, T., Gaborit, P., Aldanondo, M., and Geneste, L. (2011b). Couplage des approches par contraintes et par analogie : application à la maintenance d’hélicoptères. In *7èmes Journées Francophones de Programmation par Contraintes - JFPC’2011*.
- [Codet De Boisse et al., 2010] Codet De Boisse, A., Vareilles, E., Gaborit, P., Aldanondo, M., Coudert, T., and Geneste, L. (2010). Couplage csp et cbr : premières identifications des modes de couplage. In *8th International Conference of Modeling and Simulation - MOSIM’2010*.
- [Cordì et al., 2005] Cordì, V., Lombardi, P., Martelli, M., and Mascardi, V. (2005). An ontology-based similarity between sets of concepts. In Corradini, F., Paoli, F. D., Merelli, E., and Omicini, A., editors, *WOA*, pages 16–21. Pitagora Editrice Bologna.

- [Coudert et al., 2003] Coudert, T., Berruet, P., and Philippe, J. (2003). Integration of reconfiguration in transitive systems : an agent-based approach. In *Proceedings of IEEE SMC 2003, invited session*, pages 4008–4014.
- [Coudert et al., 2002] Coudert, T., Berruet, P., and Philippe, J.-L. (2002). From design to integration of transitive systems a component-based approach. In *IECON 02 [Industrial Electronics Society, IEEE 2002 28th Annual Conference of the]*, volume 3, pages 2497–2502.
- [Coudert and Kamsu-Foguem, 2008] Coudert, T. and Kamsu-Foguem, B. (2008). Amélioration continue : outillage d’un processus de retour d’expérience par une ontologie et des graphes conceptuels. In *Actes de la septième conférence francophone de Modélisation et SIMulation, MOSIM’08*.
- [Coudert et al., 2011a] Coudert, T., Vareilles, E., Aldanondo, M., L., G., and Abeille, J. (2011a). Synchronization of system design and project planning : Integrated model and rules. In *5th IEEE International Conference on Software, Knowledge, Information, Industrial Management and Applications (SKIMA’ 2011)*, pages 1–6.
- [Coudert et al., 2012] Coudert, T., Vareilles, E., Geneste, L., and Aldanondo, M. (2012). Improvement of retrieval in case-based reasoning for system design. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management - IEEM’2012*.
- [Coudert et al., 2011b] Coudert, T., Vareilles, E., Geneste, L., Aldanondo, M., and Abeille, J. (2011b). Proposal for an integrated case based project planning and system design process. In *Proceedings of the 2nd International Conference en Complex Systems Design and Management, CSDM’2011*. Springer Verlag.
- [Croom et al., 2000] Croom, S., Romano, P., and Giannakis, M. (2000). Supply chain management : an analytical framework for critical literature review. *European Journal of Purchasing and Supply Management*, 6(1) :67–83.
- [Dalkir, 2011] Dalkir, K. (2011). *Knowledge Management Converting Theory Into Practice 2nd Edition*. Boston, MA : MIT Press, 2nd ed. edition.
- [Danilovic and Browning, 2007] Danilovic, M. and Browning, T. (2007). Managing complex product development projects with design structure matrices and domain mapping matrices. *International Journal of Project Management*, 25(3) :300 – 314.
- [Darlington and Culley, 2008] Darlington, M. and Culley, S. (2008). Investigating ontology development for engineering design support. *Advanced Engineering Informatics*, 22(1) :112–134.
- [Deb et al., 2002] Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., and Meyarivan, T. (2002). A fast and elitist multi-objective genetic algorithm : Nsga-ii. *Trans. Evol. Comp.*, 6(2) :182–197.
- [Dempster et al., 1977] Dempster, A. P., Laird, N. M., and Rubin, D. B. (1977). Maximum likelihood from incomplete data via the em algorithm. *Journal of the royal statistical society, Series B*, 39(1) :1–38.
- [Denis, 2000] Denis, F. (2000). *Apprentissage automatique : des modèles formels aux applications*. Habilitation à diriger des recherches, Université des sciences et technologies de Lille.
- [Dieng and Hug, 1998] Dieng, R. and Hug, S. (1998). Comparison of personal ontologies represented through conceptual graphs. In *ECAI*, pages 341–345.
- [Djefel, 2010] Djefel, M. (2010). *Couplage de la configuration de produit et de projet de réalisation : exploitation des approches par contraintes et des algorithmes évolutionnaires*. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Toulouse.

-
- [Domshlak et al., 2011] Domshlak, C., Hüllermeier, E., Kaci, S., and Prade, H. (2011). Preferences in AI : An overview. *Artif. Intell.*, 175(7-8) :1037–1052.
- [Dorigo, 1992] Dorigo, M. (1992). *Optimization, learning and natural algorithms*. PhD thesis, Politecnico di Milano, Italy.
- [Dorigo and Stützle, 2004] Dorigo, M. and Stützle, T. (2004). *Ant Colony Optimization*. Bradford Company, Scituate, MA, USA.
- [Dubois et al., 1998] Dubois, D., Prade, H., Esteva, F., Garcia, P., Godo, L., and Lopez de Mantaras, R. (1998). Fuzzy set modelling in case-based reasoning. *International Journal of Intelligent Systems*, 13(4) :345–373.
- [Easterby-Smith and Lyles, 2011] Easterby-Smith, M. and Lyles, M. (2011). *Handbook of organizational learning and knowledge management*. Wiley, 2nd ed. edition.
- [Eisner, 1997] Eisner, H. (1997). *Essentials Of Project And Systems Engineering Management*. New York, Wiley.
- [Ernst, 1998] Ernst, R. (1998). Codesign of embedded systems : Status and trends. *IEEE Des. Test*, 15(2) :45–54.
- [Evrard-Samuel and Spalanzani, 2009] Evrard-Samuel, K. and Spalanzani, A. (2009). Developing collaborative competencies within supply chains. *Learning and Instruction*, 10(2) :113–136.
- [Faisandier, 2012] Faisandier, A. (2012). *Systems Architecture and Designt*. Sinergy'Com, 2nd ed. edition.
- [Faure and Bisson, 1999] Faure, A. and Bisson, G. (1999). Modeling the experience feedback loop to improve knowledge base reuse in industrial environment. In *12th workshop on knowledge aquisi-tion, modelling and management*.
- [Ferber, 1995] Ferber, J. (1995). *Les systèmes multi-agents : vers une intelligence collective*. InterEd-itions, Paris.
- [Ferris, 2008] Ferris, T. (2008). Systems engineering process standardization and cultural diversity. In *19th International Engineering Management Conference Managing Creativity the Rise of the Creative Class*. IEEE.
- [Finnie and Sun, 2003] Finnie, G. and Sun, Z. (2003). R⁵ model for case-based reasoning. *Knowl.-Based Syst*, 16(1) :59–65.
- [Flynn and Flynn, 2005] Flynn, B. and Flynn, E. (2005). Synergies between supply chain management and quality management : emerging implications. *International Journal of Production Research*, 43(16) :3421–3436.
- [Fonseca and Fleming, 1993] Fonseca, C. and Fleming, P. (1993). Genetic algorithms for multiobjec-tive optimization : Formulation, discussion and generalization. In Kaufmann, M., editor, *Proceed-ings of the Fifth international conference on genetic algorithms*, pages 416–423.
- [Forsberg et al., 2005] Forsberg, K., Mooz, H., and Cotterman, H. (2005). *Visualizing Project Man-agement : Models and Frameworks for Mastering Complex Systems*. Wiley.
- [Foster, 2008] Foster, T. (2008). Towards an understanding of supply chain quality management. *Jour-nal of Operations Management*, 26(4) :461– 467.
- [Frank, 1996] Frank, P. (1996). Analytical and qualitative model-based fault diagnosis – a survey and some new results. *European Journal of Control*, 2(1) :6 – 28.

- [Gelle et al., 2000] Gelle, E., Faltings, B., Clément, D., and Smith, I. (2000). Constraint satisfaction methods for applications in engineering. *Eng. Comput. (Lond.)*, 16(2) :81–95.
- [Genest and Salvat, 1998] Genest, D. and Salvat, E. (1998). A platform allowing typed nested graphs : How cogito became cogitant (research note). In *Proceedings of the 6th International Conference on Conceptual Structures : Theory, Tools and Applications*, ICCS'98, pages 154–164, London, UK. Springer-Verlag.
- [Glover, 1994] Glover, F. (1994). Tabu search for nonlinear and parametric optimization (with links to genetic algorithms). *Discrete Applied Mathematics*, 49(1–3) :231 – 255.
- [Goel and Craw, 2006] Goel, A. and Craw, S. (2006). Design, innovation and case-based reasoning. *Knowledge Engineering Review*, 20(3) :271–276.
- [Goldberg, 1989] Goldberg, D. (1989). *Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning*. Addison-Wesley, Reading, MA.
- [Gomez de Silva-Garza and Maher, 1996] Gomez de Silva-Garza, A. and Maher, M. (1996). Design by interactive exploration using memory-based techniques. *Knowledge-Based Systems*, 9(3)(1) :151–161.
- [Goncalves-Coelho, 2004] Goncalves-Coelho, A. (2004). Axiomatic design and the concurrent engineering paradigm. In *Proceedings of COSME*.
- [Gruber, 1993] Gruber, T. (1993). A translation approach to portable ontology specifications. *Knowledge Acquisition*, 5(2) :199–220.
- [Gunasekaran and Kobu, 2007] Gunasekaran, A. and Kobu, B. (2007). Performance measures and metrics in logistics and supply chain management : a review of recent literature (1995–2004) for research and applications. *International Journal of Production Research*, 45(12) :2819–2840.
- [Haberfellner and De Weck, 2005] Haberfellner, R. and De Weck, O. (2005). Agile systems engineering versus engineering agile systems. In *INCOSE 2005 - Systems Engineering Symposium*, Melbourne, Australia. International Council on Systems Engineering.
- [Harland, 1996] Harland, C. (1996). Supply chain management : relationships, chains and networks. *British Journal of Management*, 7 :63–80.
- [Haskins, 2011] Haskins, C. (2011). *Systems Engineering Handbook : A Guide for Systems Life Cycle Processes and Activities*. INCOSE.
- [Heide and George, 1990] Heide, J. and George, J. (1990). Alliances in industrial purchasing : The determinants of joint action in buyer-supplier relationships. *Journal of Marketing Research*, 27(1) :pp. 24–36.
- [Horn et al., 1994] Horn, J., Nafpliotis, N., and Goldberg, D. (1994). A niched pareto genetic algorithm for multiobjective optimization. In *Evolutionary Computation, 1994. IEEE World Congress on Computational Intelligence., Proceedings of the First IEEE Conference on*, pages 82–87.
- [Houe et al., 2011] Houe, R., Grabot, B., and Tchuente, G. (2011). Fuzzy logic in competence management. In *Proceedings of the 7th conference of the European society for fuzzy logic and technology (EUSFLAT-2011) AND LFA-2011*, Advances in Intelligent Systems Research, pages 651–656.
- [Huyet and Paris, 2004] Huyet, A. L. and Paris, J. L. (2004). Synergy between evolutionary optimization and induction graphs learning for simulated manufacturing systems. *International Journal of Production Research*, 42(20) :4295–4313.

-
- [IAQG, 2010] IAQG (2010). Supply chain management handbook - chap. 9.
- [ISO15288, 2008] ISO15288 (2008). Iso/iec 15288 :2008 : Systems and software engineering — system life cycle processes. Geneva, Switzerland.
- [Jabrouni et al., 2011] Jabrouni, H., Kamsu-Foguem, B., Geneste, L., and Vaysse, C. (2011). Continuous improvement through knowledge-guided analysis in experience feedback. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 24(8) :1419 – 1431.
- [Jabrouni et al., 2013] Jabrouni, H., Kamsu-Foguem, B., Geneste, L., and Vaysse, C. (2013). Analysis reuse exploiting taxonomical information and belief assignment in industrial problem solving. *Computers in Industry*, 64(8) :1035 – 1044.
- [Jourdan et al., 2005] Jourdan, L., Corne, D. W., Savic, D., and Walters, G. (2005). Lemmo : Hybridising rule induction and nsga ii for multi-objective water systems design. In *Proceedings of Computing and Control in the Water Industry Conference*, pages 45–50.
- [Junker and Mailharro, 2003] Junker, U. and Mailharro, D. (2003). Preference programming : Advanced problem solving for configuration. *AI EDAM - Artificial Intelligence for Engineering Design Analysis and Manufacturing*, 17(1) :13–29.
- [Kamsu-Foguem et al., 2008] Kamsu-Foguem, B., Coudert, T., Beler, C., and Geneste, L. (2008). Knowledge formalization in experience feedback processes : An ontology-based approach. *Computers in Industry*, 59(7) :694–710.
- [Kamsu-Foguem and Noyes, 2013] Kamsu-Foguem, B. and Noyes, D. (2013). Graph-based reasoning in collaborative knowledge management for industrial maintenance. *Computers in Industry*, 64(8) :998–1013.
- [Kennedy and Russell, 1995] Kennedy, J. and Russell, E. (1995). Particle swarm optimization.
- [Kim et al., 2006] Kim, K., Manley, D., and Yang, H. (2006). Ontology-based assembly design and information sharing for collaborative product development. *Computer-Aided Design*, 38(12) :1233 – 1250.
- [Kindler et al., 2004] Kindler, E., Coudert, T., and Berruet, P. (2004). Component-based simulation for a reconfiguration study of transitic systems. *SIMULATION-TRANSACTIONS OF THE SOCIETY FOR MODELING AND SIMULATION INTERNATIONAL*, 80(3) :153–163.
- [Kirkpatrick, 1984] Kirkpatrick, S. (1984). Optimization by simulated annealing : Quantitative studies. *Journal of Statistical Physics*, 34(5-6) :975–986.
- [Knowles et al., 2005] Knowles, G., Wicker, L., Femat, J., and Canales, F. (2005). A conceptual model for the application of six sigma methodologies to supply chain improvement. *International Journal of Logistics : Research and Applications*, 8 :51–65.
- [Kolb, 1984] Kolb, D. (1984). *Experiential learning : experience as the source of learning and development*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- [Kolodner, 1993] Kolodner, J. (1993). *Case-Based Reasoning*. Morgan Kaufmann, San Mateo, CA.
- [Laprie, 1995] Laprie, J.-C. (1995). Dependable computing : Concepts, limits, challenges. In *Proceedings of the Twenty-Fifth International Conference on Fault-tolerant Computing*, FTCS'95, pages 42–54, Washington, DC, USA. IEEE Computer Society.
- [Lau et al., 2009] Lau, A. S. M., Tsui, E., and Lee, W. B. (2009). An ontology-based similarity measurement for problem-based case reasoning. *Expert Syst. Appl*, 36(3) :6574–6579.

- [Lhomme, 1993] Lhomme, O. (1993). Consistency techniques for numeric csps. In *Proceeding of the international conference IJCAI'93*, pages 232–238.
- [Liu, 2005] Liu, H. (2005). New similarity measures between intuitionistic fuzzy sets and between elements. *Mathematical and Computer Modelling*, 42(1–2) :61–70.
- [Locatelli et al., 2013] Locatelli, G., Mancini, M., and Romano, E. (2013). Systems engineering to improve the governance in complex project environments. *International Journal of Project Management*, (0).
- [Lu et al., 2008] Lu, R., Peng, W., and Wang, C. (2008). Integration of product design process and task management for product data management systems. In Xu, L., Tjoa, A., and Chaudhry, S., editors, *Research and Practical Issues of Enterprise Information Systems II*, volume 254 of *IFIP — The International Federation for Information Processing*, pages 207–218. Springer US.
- [Lyles and Easterby-Smith, 2003] Lyles, M. and Easterby-Smith, M. (2003). *The Blackwell handbook of organizational learning and knowledge management*. Blackwell.
- [Maher and Gomez de Silva Garza, 1997] Maher, M.-L. and Gomez de Silva Garza, A. (1997). Case-based reasoning in design. *IEEE Expert*, 12(2) :34–41.
- [Maheswari and Varghese, 2005] Maheswari, J. and Varghese, K. (2005). Project scheduling using dependency structure matrix. *International Journal of Project Management*, 23 :223–230.
- [Martin, 2000] Martin, J. N. (2000). Processes for engineering a system : an overview of the ansi/eia 632 standard and its heritage. *Systems Engineering*, 3(1) :1–26.
- [Merigó and Gil-lafuente, 2008] Merigó, J. and Gil-lafuente, A. (2008). Using the owa operator in the minkowski distance.
- [Michalski, 2000] Michalski, R. (2000). Learnable evolution model : Evolutionary processes guided by machine learning. *Machine Learning*, 38(1-2) :9–40.
- [Mirdamadi, 2009] Mirdamadi, S. (2009). *Modélisation du processus de pilotage d'un atelier en temps réel à l'aide de la simulation en ligne couplée à l'exécution*. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Toulouse.
- [Montanari, 1974] Montanari, U. (1974). Networks of constraints : Fundamental properties and application to picture processing. *Information Science*, 7 :95–132.
- [Mouchard et al., 2000] Mouchard, J., Berruet, P., Philippe, J., and J.P., G. (2000). Modeling, simulating and validation : An application to the design of transitic systems. In *Proceedings of IFAC MCPL2000*, pages 109–114.
- [Mouchard, 2002] Mouchard, J.-S. (2002). *Proposition d'une approche méthodique pour la conception des systèmes automatisés de production : application aux systèmes transitiqes*. PhD thesis, Université de Bretagne Sud.
- [Mugnier and Chein, 1998] Mugnier, M. and Chein, M., editors (1998). *Conceptual Structures : Theory, Tools and Applications, 6th International Conference on Conceptual Structures, ICCS '98, Montpellier, France, August 10-12, 1998, Proceedings*, volume 1453 of *Lecture Notes in Computer Science*. Springer.
- [Nanda et al., 2007] Nanda, J., Thevenot, H., Simpson, T., Stone, R., Bohm, M., and Shooter, S. (2007). Product family design knowledge representation, aggregation, reuse, and analysis. *AI EDAM-Artificial Intelligence for Engineering Design Analysis and Manufacturing*, 21(2) :173–192.

-
- [Naïm et al., 2007] Naïm, P., Wuillemin, P., Leray, P., Pourret, O., and Becker, A. (2007). *Réseaux bayésiens - 3ème édition*. Eyrolles.
- [Negny and Le Lann, 2008] Negny, S. and Le Lann, J. (2008). Case-based reasoning for chemical engineering design. *Chemical Engineering Research and Design*, 86 (6) :648–658.
- [Negny et al., 2010] Negny, S., Riesco, H., and Le Lann, J. (2010). Effective retrieval and new indexing method for case based reasoning : Application in chemical process design. *Eng. Appl. of AI*, 23(6) :880–894.
- [Pantazi et al., 2004] Pantazi, S., Arocha, J., and Moehr, J. (2004). Case-based medical informatics. *BMC Medical Informatics and Decision Making*, 4(1) :19.
- [Patton and Chen, 1994] Patton, R. and Chen, J. (1994). Review of parity space approaches to fault diagnosis for aerospace systems. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 17(2) :278–285.
- [Pearl, 1988] Pearl, J. (1988). *Probabilistic Reasoning in Intelligent Systems : Networks of Plausible Inference*. Morgan Kaufmann.
- [Pelikan et al., 2007] Pelikan, M., Hartmann, A., and Lin, T. (2007). Parameter-less hierarchical bayesian optimization algorithm. In Lobo, F., Lima, C., and Michalewicz, Z., editors, *Parameter Setting in Evolutionary Algorithms*, volume 54 of *Studies in Computational Intelligence*, pages 225–239. Springer Berlin Heidelberg.
- [Pillet et al., 2013] Pillet, M., Maire, J., Pralus, M., and Boissière, J. (2013). Structuration des démarches de progrès. In *10ème Congrès international de Génie Industriel - CIGI'2013*.
- [Pitiot, 2009] Pitiot, P. (2009). *Amélioration des techniques d'optimisation combinatoire par utilisation d'un mécanisme de retour d'expérience : Application à la sélection de scénarios en conception préliminaire de produit / projet*. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Toulouse.
- [Pitiot et al., 2014] Pitiot, P., Aldanondo, M., and Vareilles, E. (2014). Concurrent product configuration and process planning : Some optimization experimental results. *COMPUTERS IN INDUSTRY*, 65(4) :610–621.
- [Pitiot et al., 2007a] Pitiot, P., Coudert, T., Geneste, L., and Baron, C. (2007a). A framework for the improvement of combinatorial optimization : An experience feedback approach. In *Proceedings of the 4th IFAC Conference on Management and Control of Production and Logistics - MCPL'07*, volume 3, pages 565–570.
- [Pitiot et al., 2007b] Pitiot, P., Coudert, T., Geneste, L., and Baron, C. (2007b). Improvement of intelligent optimisation by an experience feedback approach. In in *Computers Science*, S. L. N., editor, *Proceedings of the 8th International Conference on Artificial Evolution - EA'07*, volume 4926, pages 316–327.
- [Pitiot et al., 2008] Pitiot, P., Coudert, T., Geneste, L., and Baron, C. (2008). An expert knowledge reuse to guide evolutionary computation. In *Proceedings of the International Conference on Metaheuristics and Nature Inspired Computing - META'08*.
- [Pitiot et al., 2009] Pitiot, P., Coudert, T., Geneste, L., and Baron, C. (2009). A priori knowledge integration in intelligent optimization. In in *Computers Science*, S. L. N., editor, *Proceedings of the 9th International Conference on Artificial Evolution - EA'09*, volume 5975, pages 98–109.

- [Pitiot et al., 2010] Pitiot, P., Coudert, T., Geneste, L., and Baron, C. (2010). Hybridation of bayesian networks and evolutionary algorithms for multi-objective optimization in an integrated product design and project management context. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 23(5) :830 – 843.
- [PMBok, 2013] PMBoK (2013). *A guide to the project management body of knowledge (PMBOK guide)*. – *Fifth edition*. Project Management Institute.
- [Policastro et al., 2008] Policastro, C., De Carvalho, A., and Delbem, A. (2008). A hybrid case adaptation approach for case-based reasoning. *Applied Intelligence*, 28(2) :101–119.
- [Pyster and Olwell, 2013] Pyster, A. and Olwell, D. (2013). *The Guide to the Systems Engineering Body of Knowledge (SEBoK)*, v. 1.2. Hoboken.
- [Rakoto, 2004] Rakoto, H. (2004). *Integration du Retour d'Expérience dans les processus industriels – application a Alstom Transport*. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Toulouse.
- [Rakoto et al., 2002] Rakoto, H., Clermont, P., and Geneste, L. (2002). Elaboration and exploitation of lessons learned. In Musen, M., Neumann, B., and Studer, R., editors, *Intelligent Information Processing*, volume 93 of *IFIP — The International Federation for Information Processing*, pages 297–300. Springer US.
- [Richards and Simoff, 2001] Richards, D. and Simoff, S. (2001). Design ontology in context - a situated cognition approach to conceptual modelling. *AI in Engineering*, 15(2) :121–136.
- [Roche, 2000] Roche, C. (2000). Corporate ontologies and concurrent engineering. *Journal of Materials Processing Technology*, 107(1-3) :187–193.
- [Romero, 2010] Romero, J. (2010). Étude d'un module de réutilisation de cas en utilisant le formalisme des graphes conceptuels dans le contexte du projet anr atlas.
- [Romero, 2013] Romero, J. (2013). *Collaborative Problem Solving Within Supply Chains : General Framework, Process and Methodology*. PhD thesis, INP Toulouse, Ecole Doctorale Systèmes.
- [Romero et al., 2012a] Romero, J., Coudert, T., Geneste, L., and De Valroger, A. (2012a). Collaborative methodology for supply chain quality management : Framework and integration with strategic decision processes in product development. In *Proceedings of the 6th European Conference on Information Management and Evaluation – ECIME 2012*, pages 418–428.
- [Romero et al., 2012b] Romero, J., Coudert, T., Geneste, L., and De Valroger, A. (2012b). Technical and collaboration breakdown structures : Drivers of collaborative problem solving approaches in a supply chain context. In *Proceedings of the 14th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing – INCOM'2012*, volume 14, pages 1184–1189.
- [Romero et al., 2014] Romero, J., Coudert, T., Vareilles, E., Geneste, L., Aldanondo, M., and Abeille, J. (2014). Case-based reasoning and system design : An integrated approach based on ontology and preference modeling. *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing*, 28 :49–69.
- [Ruet and Geneste, 2002] Ruet, M. and Geneste, L. (2002). Search and adaptation in a fuzzy object oriented case base,. In *Proceedings of the 6th European Conference on Case Based Reasoning*, volume 2416, pages 350–364. LNAI.
- [Saridakis and Dentsoras, 2007] Saridakis, K. and Dentsoras, A. (2007). Case-desc : A system for case-based design with soft computing techniques. *Expert Systems with Applications*, 32(2) :641–657.

-
- [Scaravetti, 2004] Scaravetti, D. (2004). *Formalisation préalable d'un problème de conception, pour l'aide à la décision en conception préliminaire*. PhD thesis, Ecole Nationale Supérieure des Arts et Métiers.
- [Schoettl and Lindemann, 2014] Schoettl, F. and Lindemann, U. (2014). Design for system lifecycle properties – a generic approach for modularizing systems. *Procedia Computer Science*, 28(0) :682 – 691. 2014 Conference on Systems Engineering Research.
- [Schreiber et al., 1994] Schreiber, G., Wielinga, B., de Hoog, R., Akkermans, H., and Van de Velde, W. (1994). Commonkads : A comprehensive methodology for kbs development. *IEEE Expert : Intelligent Systems and Their Applications*, 9(6) :28–37.
- [Sharon et al., 2013] Sharon, A., de Weck, O., and Dori, D. (2013). Improving project-product life-cycle management with model-based design structure matrix : A joint project management and systems engineering approach. *Systems Engineering*, 16(4) :413–426.
- [Sharon et al., 2009] Sharon, A., de Weck, O. L., and Dori, D. (2009). Is there a complete project plan ? a model-based project planning approach. In *Proceedings of the 19th Annual International INCOSE Symposium*, number Paper 329, Singapore. International Council on Systems Engineering.
- [Sharon et al., 2011] Sharon, A., de Weck, O. L., and Dori, D. (2011). Project management vs. systems engineering management : A practitioners' view on integrating the project and product domains. *Syst. Eng.*, 14(4) :427–440.
- [Siarry, 2014] Siarry, S. (2014). *Métaheuristiques*. Eyrolles, first edition edition.
- [Smets, 1993] Smets, P. (1993). Belief functions : The disjunctive rule of combination and the generalized bayesian theorem. *International Journal of Approximate Reasoning*, 9(1) :1–35.
- [Sowa, 1976] Sowa, J. (1976). Conceptual graphs for a data base interface. *IBM Journal of Research and Development*, 20(4) :336–357.
- [Sowa, 1984] Sowa, J. F. (1984). *Conceptual Structures : Information Processing in Mind and Machine*. Addison-Wesley.
- [Srinivas and Deb, 1994] Srinivas, N. and Deb, K. (1994). Multiobjective optimization using nondominated sorting in genetic algorithms. *Evolutionary Computation*, 2 :221–248.
- [Stadler, 1979] Stadler, W. (1979). A survey of multicriteria optimization or the vector maximum problem, part i : 1776–1960. *Journal of Optimization Theory and Applications*, 29(1) :1–52.
- [Stefania Montani, 2011] Stefania Montani, S. (2011). How to use contextual knowledge in medical case-based reasoning systems : A survey on very recent trends. *Artificial Intelligence in Medicine*, 51(2) :125 – 131.
- [Stewart and Tate, 2000] Stewart, D. and Tate, D. (2000). Integration of axiomatic design and project planning. In *Proceedings of the First International Conference on Axiomatic Design - ICAD2000*, pages 285–289.
- [Studer et al., 1998] Studer, R., Richard Benjamins, R., and Fensel, D. (1998). Knowledge engineering : Principles and methods. *Data Knowledge Engineering*, 25(1-2) :161–197.
- [Suh, 1990] Suh, N. (1990). *The principles of design*. Oxford University Press, New York.
- [Sun et al., 2008] Sun, Z., Han, J., and Dong, D. (2008). Five perspectives on case based reasoning. In Huang, D.-S., Wunsch, Donald C., I., Levine, D., and Jo, K.-H., editors, *Advanced Intelligent Computing Theories and Applications. With Aspects of Artificial Intelligence*, volume 5227 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 410–419. Springer Berlin Heidelberg.

- [Taylor and Zorn, 2004] Taylor, J. and Zorn, T. (2004). Knowledge management and/as organizational communication. In *Proceedings of the annual meeting of the International Communication Association*, pages 329–342.
- [Toguyéni et al., 2003] Toguyéni, A., Berruet, P., and Craye, E. (2003). Models and algorithms for failure diagnosis and recovery in fmss. *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, 15(1) :57–85.
- [Towhidnejad et al., 2013] Towhidnejad, M., Ferris, T. L., Squires, A., and Madachy, R. (2013). Enabling systems engineering program outcomes via systems engineering body of knowledge. *Procedia Computer Science*, 16(0) :983–989. 2013 Conference on Systems Engineering Research.
- [Trentesaux, 2002] Trentesaux, D. (2002). *Pilotage hétérarchique des systèmes de production*. Habilitation à diriger des recherches, Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis.
- [Uschold and Gruninger, 1996] Uschold, M. and Gruninger, M. (1996). Ontologies : Principles, methods and applications. *Knowledge Sharing and Review*, 11(2) :93–155.
- [Valente and Breuker, 1996] Valente, A. and Breuker, J. (1996). Towards principled core ontologies.
- [van Heijst et al., 1997] van Heijst, G., Schreiber, A. T., and Wielinga, B. J. (1997). Using explicit ontologies in kbs development. *Int. J. Hum.-Comput. Stud.*, 46(2-3) :183–292.
- [Vareilles et al., 2012a] Vareilles, E., Aldanondo, M., Codet de Boisse, A., Coudert, T., Gaborit, P., and Geneste, L. (2012a). How to take into account general and contextual knowledge for interactive aiding design : Towards the coupling of csp and cbr approaches. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 25(1) :31–47.
- [Vareilles et al., 2012b] Vareilles, E., Coudert, T., Aldanondo, M., Geneste, L., and Abeille, J. (2012b). Coupling system design and project planning : discussion on a bijective link between system and project structures. In Borangiu, T., Dolgui, A., Dumitrache, I., and Filip, F., editors, *Proceedings of the 14th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing - INCOM'2012*, pages 1089–1094.
- [Vareilles et al., 2012c] Vareilles, E., Gaborit, P., Aldanondo, M., Carbonnel, S., and Steffan, L. (2012c). CoFiADe Constraints Filtering for Aiding Design. In *JFPC 2012*, page paper9, Toulouse, France.
- [Vernadat, 2010] Vernadat, F. (2010). Technical, semantic and organizational issues of enterprise interoperability and networking. *Annual Reviews in Control*, 34(1) :139 – 144.
- [Wagner and Hoegl, 2006] Wagner, S. and Hoegl, M. (2006). Involving suppliers in product development : Insights from research and development directors and project managers. *Industrial Marketing Management*, 35(8) :936–943.
- [Wang, 1997] Wang, W. (1997). New similarity measures on fuzzy sets and on elements. *Fuzzy Sets and Systems*, 85(3) :305–309.
- [Wu et al., 2008] Wu, M., Lo, Y., and Hsu, S. (2008). A fuzzy cbr technique for generating product ideas. *Expert Systems with Applications*, 34(1) :530–540.
- [Wu and Palmer, 1994] Wu, Z. and Palmer, M. (1994). Verb semantics and lexical selection. In *32nd Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics*, pages 133–138, New Mexico State University, Las Cruces, New Mexico.

-
- [Xuanyuan et al., 2011] Xuanyuan, S., Jiang, Z., Li, Y., and Li, Z. (2011). Case reuse based product fuzzy configuration. *Advanced Engineering Informatics*, 25(2) :193–197.
- [Yager, 2004] Yager, R. (2004). Generalized owa aggregation operators. *Fuzzy Optimization and Decision Making*, 3(1) :93–107.
- [Yang et al., 2008] Yang, D., Dong, M., and Miao, R. (2008). Development of a product configuration system with an ontology-based approach. *Computer Aided Design*, 40(8) :863–878.
- [Zarandi et al., 2011] Zarandi, M., Razaee, Z., and Karbasian, M. (2011). A fuzzy case based reasoning approach to value engineering. *Expert Systems with Applications*, 38(8) :9334–9339.
- [Zhang et al., 2003] Zhang, J., Zhang, S., Chen, C. C., and Wang, B. (2003). Semantic interoperability based on ontology mapping in distributed collaborative design environment. In Ruiz, E. M., Segovia, J., and Szczepaniak, P. S., editors, *AWIC*, volume 2663 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 208–217. Springer.
- [Zhou et al., 2011] Zhou, A., Qu, B., Li, H., Zhao, S., Suganthan, P., and Zhang, Q. (2011). Multiobjective evolutionary algorithms : A survey of the state of the art. *Swarm and Evolutionary Computation*, 1(1) :32 – 49.
- [Zitzler et al., 2001] Zitzler, E., Laumanns, M., and Thiele, L. (2001). Spea2 : Improving the strength pareto evolutionary algorithm. Technical report, Computer Engineering and Networks Laboratory, Swiss Federal Institute of Technology (ETH).
- [Zitzler and Thiele, 1999] Zitzler, E. and Thiele, L. (1999). Multiobjective evolutionary algorithms : a comparative case study and the strength pareto approach. *Evolutionary Computation, IEEE Transactions on*, 3(4) :257–271.