

# **Habilitation à Diriger des Recherches**

Présentée à

**L'Université Montpellier II  
Ecole doctorale ISS  
(Information, Structures et Systèmes)**

par

**Vincent Chapurlat**

Docteur de l'Université Montpellier II

61<sup>ème</sup> section CNU

## **Vérification et validation de modèles de systèmes complexes: application à la Modélisation d'Entreprise**

Soutenue le 1<sup>er</sup> Mars 2007 devant le jury constitué de :

Professeur Pierre Ladet, Institut National Polytechnique de Grenoble, Grenoble	Rapporteur
Professeur Gérard Morel, Université Henri Poincaré, Nancy	Rapporteur
Professeur Hervé Pingaud, Ecole des Mines Albi-Carmaux, Albi	Rapporteur
Giuseppe Berio, Chercheur confirmé, Università degli Studi di Torino, Turin	Examineur
Professeur Jean-Pierre Bourey, Ecole Centrale de Lille, Lille	Examineur
Professeur Bruno Vallespir, LAPS, Université Bordeaux I, Bordeaux	Examineur
Professeur René Zapata, Université Montpellier II, Montpellier	Examineur

## Remerciements

---

Ces années passées dans le domaine de l'enseignement et de la recherche m'ont permis de côtoyer de nombreuses personnes. Je ne saurais donc faire un bilan de mon activité sans commencer par remercier du fond du cœur ces personnes, ces collègues et ces amis. Certains ont su m'insuffler l'enthousiasme, la curiosité et l'envie de faire ce que je j'ai fait. Certains m'ont accordé leur confiance et m'ont poussé à bâtir ce qui est décrit dans ce mémoire.

Je tiens donc à remercier tout d'abord François Prunet qui a dirigé mes premiers pas et m'a toujours encouragé, Janine Magnier qui m'a offert ma première chance professionnelle et m'a guidé et, enfin, Christian Durante pour l'oreille confiante qu'il m'a accordée en des temps difficiles.

Je tiens à adresser ensuite tous mes remerciements à Messieurs les Professeurs Gérard Morel, Pierre Ladet, Hervé Pingaud, Bruno Vallespir, Jean-Pierre Bourey, René Zapata et M. Giuseppe Berio d'avoir acceptés d'être membres de ce jury. Ils m'ont accompagné, par leurs remarques toujours constructives et au travers de quelques bonnes discussions, pour peaufiner mon activité et ont su m'aider à me situer et à parfaire une certaine vision des choses.

Merci aux jeunes chercheurs et aux étudiants que j'ai eu le privilège et le grand plaisir d'accompagner un bout de temps. J'espère leur avoir apporté quelque chose. J'ai pour ma part beaucoup appris à leur contact et j'apprécie encore aujourd'hui leur implication.

Merci aux collègues, chercheurs(ses) et administratifs(ves), avec qui et auprès de qui je continue d'avancer et de compléter mon expérience. Je ne peux et ne souhaite pas faire une liste qui sera de toute manière non exhaustive. Merci quand même à Aline, Isabelle, Didier, Christian, Pascal, Anne Lise, Gérard, Sylvie R. et C., Thomas et tous les autres avec qui les discussions et les échanges ont été toujours fructueux et amicaux.

Merci aux copains pour leur soutien et leur amitié infaillible : Nathalie, Dominique, Corinne, Valérie, Philippe, Gérard, ...

Un énorme merci et plein de choses à Joëlle pour m'avoir patiemment regardé aller et venir entre toutes mes activités et d'avoir toujours su trouver les mots pour me pousser. Merci et bisous à Robin et à Malou pour leur support inconditionnel.

*Nîmes, le 1<sup>er</sup> mars 2007*  
*V.Chapurlat*

## **AVANT PROPOS**

---

L'objectif de ce mémoire est de démontrer la cohérence des travaux fournis dans le cadre de mes activités de recherche, d'enseignement et de transfert depuis fin 1991 en vue d'obtenir une Habilitation à Diriger des Recherches.

Je considère que la mission d'un enseignant chercheur, dans une Ecole des Mines ou en Université, se décline en trois missions :

- La **recherche** : Elle doit permettre à l'enseignant chercheur d'acquérir et de maîtriser de la connaissance mais aussi de se démarquer. Elle doit en effet être innovante et répondre à des problématiques, souvent d'origine industrielle, encore peu ou pas résolues mais représentant des verrous technologiques, techniques et humains forts pouvant se généraliser à d'autres types de problèmes, voire à d'autres domaines. Elle doit ensuite être reconnue par la communauté tant académique qu'industrielle. Enfin, elle doit se bâtir et mûrir au sein d'un réseau de compétences que l'enseignant chercheur se doit de constituer tant à l'intérieur qu'à l'extérieur du laboratoire de rattachement, au travers de ses encadrements, de ses contacts et de projets communs.

- La **formation** : Souvent relativement spécialisée, elle nécessite une certaine maturité scientifique et technique de la part de l'enseignant chercheur pour pouvoir être dispensée en formation initiale et complémentaire d'ingénieur généraliste mais aussi en Université et en Industrie dans le cadre de formations plus spécifiques.

- Le **transfert de technologies comme de savoirs** vers l'industrie permet enfin à l'enseignant chercheur, d'une part, d'alimenter en quelque sorte la problématique traitée de cas, d'idées et d'avancées, d'autre part, de valider sa recherche. Elle ne doit évidemment pas relever d'un travail d'ingénieur. C'est là une tâche difficile que de rester objectivement chercheur tout en répondant aux attentes souvent très concrètes d'un industriel.

**Ces trois missions ne peuvent pas être dé-corrélées les unes des autres. Cependant, dans un souci d'efficacité, l'enseignant chercheur doit privilégier une seule de ces missions. Ses résultats lui permettent ensuite de mieux remplir ses deux autres missions, alors nécessairement assujetties à cette mission principale. C'est la recherche que j'ai privilégiée depuis le début de ma carrière. La formation ne peut en**

**effet s'imaginer sans une capitalisation et une maîtrise des connaissances que l'on enseigne. De même, le transfert vers l'industrie ne peut naître sans se prévaloir d'une compétence et de résultats transférables de manière pertinente.**

Ma recherche s'est bâtie sur un constat fait dans divers cadres et dans les domaines scientifiques et techniques liés à l'amélioration de l'entreprise, à la productique. Bien que nécessaires, et même quelquefois imposées, les étapes de vérification et de validation (V&V), plus rarement de qualification ou de certification (VVQC) de modèles, restent encore méconnues, voire évitées. Elles sont en effet encore considérées comme sans réelle valeur ajoutée, pour la plupart peu conceptualisées, encore trop difficiles à mettre en œuvre dans des cas réels ou dans des cadres industriels et enfin peu ou mal outillées.

Les raisons de ce désintérêt, voire même de cette quasi méfiance, en sont diverses et variées, justifiables ou tout au moins compréhensibles. Elles sont évidemment propres à chacun de ces domaines ou aux techniques à mettre en œuvre elles-mêmes. Elles sont aussi liées aux concepts de modélisation qui sont mis à disposition des acteurs de l'entreprise.

Que faire alors pour améliorer à la fois les concepts de modélisation et la prise en compte de la VVQC en productique alors que ce sont des étapes déjà largement étudiées et reconnues dans des domaines comme l'ingénierie système, la microélectronique ou le génie logiciel ?

L'objectif de la recherche était, bien évidemment, plus intuitivement formulé au début qu'il ne l'est aujourd'hui. Il peut se formuler comme suit : il faut résoudre la contradiction entre intérêt/nécessité/prise de conscience et usage possible/réel de la VVQC dans ce domaine.

Pour cela, la recherche a consisté à développer des solutions alternatives tant en termes de modélisation de systèmes complexes, que de V&V de modèles.

Les domaines scientifiques que j'ai choisi d'explorer ont d'abord été le contrôle/commande de systèmes de production puis la modélisation d'entreprise. Je m'intéresse aujourd'hui plus globalement aux besoins de VVQC dans le domaine de la modélisation d'entreprise et de l'ingénierie et de l'analyse de systèmes complexes pour le pilotage d'une organisation en situation de risques.

Ce sont des idées personnelles, les nombreux échanges que j'ai eus avec d'autres chercheurs et d'autres communautés, ou encore certaines collaborations industrielles qui m'ont permis de développer cette recherche. Comme dit plus haut, c'est toujours ce travail de recherche que j'ai tenté ensuite de faire passer dans le cadre de mon enseignement et de transférer dans la communauté à la fois industrielle et académique.

**Cependant, ce n'est qu'à partir de septembre 2000, date à laquelle j'ai mis fin à des responsabilités pédagogiques et administratives de la filière 'Automatique et Productique' à l'EMA, que je me suis impliqué dans la préparation d'une Habilitation à Diriger des Recherches. C'était, vu les résultats scientifiques déjà obtenus et ceux en cours de validation, le moment opportun pour mener à bien ce projet. Le lecteur se rendra compte que c'est effectivement à partir de ce moment-là que je me suis résolument engagé dans une politique de publication un peu plus soutenue en particulier dans des revues.**

Ce mémoire se présente donc comme suit.

- Le premier chapitre présente mon curriculum vitæ et résume mon parcours professionnel.
- Le deuxième chapitre présente mes activités liées à l'enseignement.
- Le troisième chapitre présente les travaux de recherche entrepris et les résultats obtenus depuis le début du Doctorat en 1991. Il se conclut par le projet de recherche que je propose de suivre maintenant.
- Le quatrième chapitre présente une synthèse globale des résultats : publication, encadrements, implication dans la communauté scientifique et implication dans l'activité de transfert auprès de l'industrie.
- Enfin, cinq publications sont données in extenso en fin de document.

## Table des matières

<b>AVANT PROPOS</b> .....	<b>3</b>
<b>CURRICULUM VITÆ</b> .....	<b>11</b>
<b>A - Etat civil</b> .....	<b>11</b>
<b>B - Diplômes et Titres universitaires français</b> .....	<b>12</b>
<b>C - Evolution de carrière</b> .....	<b>12</b>
<b>ACTIVITE D'ENSEIGNEMENT</b> .....	<b>13</b>
<b>A - Thèmes abordés</b> .....	<b>13</b>
<b>B - Publics Concernés</b> .....	<b>14</b>
<b>C - Répartition</b> .....	<b>15</b>
<b>D - Responsabilités administratives</b> .....	<b>15</b>
<b>ACTIVITE DE RECHERCHE</b> .....	<b>18</b>
<b>A - Thématique : Présentation et Motivations</b> .....	<b>18</b>
1 - Modélisation.....	18
2 - Vérification, Validation, Qualification et Certification (VVQC) .....	23
<b>B - Spécification de systèmes de contrôle commande répartis</b> .....	<b>32</b>
1 - Problématique.....	32
2 - Contribution à la modélisation de SCC répartis.....	33
3 - Contribution à la validation : Simulation .....	34
4 - Résultats .....	34
5 - Evolution et perspectives.....	35
<b>C - Spécification formelle et preuve</b> .....	<b>36</b>
1 - Problématique.....	36
2 - Contribution à la modélisation : MSI et MSI Synchrones .....	36
3 - Contribution à la vérification : Logique Temporelle Linéaire .....	41
4 - Application : Vérification de propriétés de Grafset de Commande .....	44
5 - Résultats .....	46
6 - Evolution et Perspectives .....	46
<b>D - Vers la modélisation d'entreprise</b> .....	<b>47</b>
1 - Problématique globale.....	47
2 - démarche .....	55
3 - modélisation : CANEVAS et MOV.....	55
4 - Modélisation : le concept de Propriété .....	61
5 - validation : Sémantique opérationnelle et simulation .....	71
6 - Modélisation : Le Référentiel de Propriétés .....	72
7 - Vérification : Les Graphes conceptuels.....	79
8 - Application : Usage de la V&V dans une approche du risque .....	83
9 - Résultats .....	92
<b>E - Perspectives : Projet de Recherche</b> .....	<b>93</b>
1 - Confortation .....	94
2 - Exploration / conceptualisation.....	95
3 - Organisation .....	97
4 - Application .....	99
<b>F - Bibliographie</b> .....	<b>99</b>
<b>SYNTHESE DES RESULTATS</b> .....	<b>111</b>

<b>A - Publications .....</b>	<b>111</b>
1 - Manuscrit de thèse .....	112
2 - Revues Internationales avec comité de lecture .....	112
3 - Revues Nationales avec comité de lecture .....	112
4 - Conférences internationales avec actes et comité de lecture .....	113
5 - Conférences nationales avec actes et comité de lecture .....	116
6 - Chapitres d'ouvrage collectif .....	117
7 - Conférences sans actes, séminaires et journées d'étude .....	117
8 - Rapports de recherche .....	118
9 - Rapports de contrats .....	118
<b>B - Encadrement.....</b>	<b>118</b>
1 - Encadrements de thèses.....	119
2 - Encadrements de DEA.....	122
3 - Encadrements pédagogiques liés à l'activité de recherche.....	123
<b>C - Transferts et Collaborations Industrielles .....</b>	<b>124</b>
1 - PABADIS'PROMISE : PABADIS based Product Oriented Manufacturing Systems for Reconfigurable Enterprises .....	124
2 - ISyCri : Ingénierie des Systèmes de crise .....	125
3 - SOFIA II .....	125
4 - MESIMA : Manufacturing and Enterprise Simulation Arena.....	125
5 - Maîtrise des aléas de production .....	126
6 - Abondements ANVAR (1996/97, 2002/03) .....	126
7 - Autres projets.....	127
8 - Responsabilités dans le montage de projets .....	127
<b>D - Responsabilités liées à la recherche .....</b>	<b>128</b>
<b>ANNEXES .....</b>	<b>132</b>
<b>A - Détail des enseignements (1996 / 2006).....</b>	<b>132</b>
<b>B - Copie d'articles.....</b>	<b>136</b>

## Table des figures

Figure 1 : Trois périodes.....	12
Figure 2 : Répartition Cours / TD / TP (en heures équivalent TD) .....	15
Figure 3 : Synthèse des responsabilités liées à l'enseignement.....	16
Figure 4 : Synthèse d'une caractérisation d'un système complexe [Hutzler 2000].....	19
Figure 5 : Typologie et objectifs des modèles [Sagace 1999].....	20
Figure 6 : La grille SAGACE .....	21
Figure 7 : Une activité au sein d'un projet (Modélisation / VVQC / Décision et Action) .....	27
Figure 8 : V&V en fonction de l'étape du projet et/ou de l'objectif du modèle.....	28
Figure 9 : Synopsis de la Machine Séquentielle Interprétée .....	37
Figure 10 : Une transition du module GC.....	39
Figure 11 : Modèle réactif .....	40
Figure 12 : Les 4 modules d'une MSI Synchrones .....	41
Figure 13 : Traduction du graphe de commande vers des FVEs : un exemple ... ..	42
Figure 14 : Obtention de FVUs à partir des FVEs .....	42
Figure 15 : Utilisation de la dérivée booléenne .....	43
Figure 16 : Places de la VVQC en modélisation d'entreprise.....	49
Figure 17 : Techniques de vérification et de validation [Love 2003, Jagdev 1995, RPG 2001, NASA 2003, Balci 2002] .....	52
Figure 18: Méta modèle du langage de modélisation MOV .....	56
Figure 19 : Exemple de modèle de processus d'homologation.....	57
Figure 20 : Modélisation de niveau 2 de la Valeur Ajoutée .....	59
Figure 21 : Profils de Valeur Ajoutée (Niveau 3).....	60
Figure 22: Méta modèle CANEVAS .....	60
Figure 23 : Editeur MOV .....	61
Figure 24 : Les propriétés d'un système selon [Meinadier 1998].....	62
Figure 25 : Exemples de granularités typées.....	63
Figure 26 : Les faits contenus dans les ensembles $C_D$ et $E_D$ .....	64
Figure 27 : Première classification des propriétés [Lamine 2001].....	65
Figure 28 : Méta modèle du type d'une propriété .....	66
Figure 29 : Types de propriété .....	66
Figure 30 : Exemple de propriété propre [CNOMO 1987] .....	67
Figure 31 : Démarche de développement.....	69
Figure 32 : Les 5 couches concentriques de LUSP .....	69
Figure 33 : Exemple d'enrichissement (vue partielle) .....	70
Figure 34 : Modèle PMO [Rodde 1989].....	72
Figure 35 : Le référentiel de propriétés : 2 <sup>ème</sup> classification proposée .....	75
Figure 36 : Extrait du référentiel : propriétés modèle.....	77
Figure 37 : Extrait du référentiel : propriétés axiomatiques .....	77
Figure 38 : Extrait du référentiel : propriétés système .....	78
Figure 39 : Exemple dans un domaine connexe de la modélisation d'entreprise.....	78
Figure 40 : Problématique de la vérification vue comme un nécessaire compromis.....	80
Figure 41 : Processus de formalisation des concepts et des relations .....	81

Figure 42 : Extension du méta modèle proposé pour UEML (vue partielle, les extensions proposées sont précédée d'une *).....	81
Figure 43 : Règles de translation de Diagrammes de classe UML vers les Graphes Conceptuels .....	82
Figure 44 : Exemple de mise en œuvre des treillis dans la traduction d'un modèle (vue partielle).....	82
Figure 45 : processus de preuve au moyen des graphes conceptuels .....	83
Figure 46: Méthodologie d'approche du risque en entreprise [CAS 2003].....	83
Figure 47 : Le risque selon MADS-MOSAR .....	84
Figure 48: Méta modèle du risque élaboré à partir de l'approche MADS MOSAR .....	85
Figure 49 : Relation entre les situations induites et le pilotage .....	86
Figure 50 : Multi formalisme et nécessaire méta modèle commun .....	89
Figure 51 : Hyperespace du danger et DSC .....	89
Figure 52 : Exemples de déficits dans un processus de distribution de médicament.....	90
Figure 53 : Dissonances .....	90
Figure 54 : Processus de modélisation / analyse multi formalisme / simulation .....	91
Figure 55 : Synthèse de l'activité de publication .....	111
Figure 56 : Synthèse des encadrements de recherche (Thèses, DEA, Autres).....	119
Figure 57 : Responsabilités et implications dans la communauté scientifique .....	129

## **Tableaux récapitulatifs**

---

Tableau 1 : Encadrements de stagiaires à des fins pédagogique.....	17
Tableau 2 : Synthèse des résultats essentiels pour cette thématique .....	35
Tableau 3 : Sémantique opérationnelle simplifiée d'une transition .....	40
Tableau 4 : Synthèse des résultats essentiels dans cette thématique.....	46
Tableau 5 : Les critères de valeur ajoutée retenus .....	58
Tableau 6 : Synthèse des résultats essentiels sur cette thématique de la modélisation d'entreprise.....	93
Tableau 7 : Thèses encadrées ou en cours.....	122
Tableau 8 : Encadrements de DEA.....	122
Tableau 9 : Encadrements d'élèves et de stagiaires à des fins de recherche .....	123
Tableau 10 : Support à la communauté de recherche.....	131
Tableau 11 : Jurys de thèses (outre les jurys de E.Lamine et B.Kamsu Foguem) .....	131
Tableau 12 : Autres implications et responsabilités.....	131

## **CURRICULUM VITÆ**

---

### **A - ETAT CIVIL**

Nom : **CHAPURLAT**

Prénoms : **Vincent**, Elie, Germain

Né le : 20 Avril 1965 à Carpentras (84)

Situation : Maître Assistant à l'Ecole Nationale Supérieure des Techniques professionnelles Industrielles et des Mines d'Alès (ENSTIMA ou EMA), affecté au Laboratoire de Génie Informatique et d'Ingénierie de Production (LGI2P) depuis le 1<sup>er</sup> Juillet 1996

Situation de famille : Marié, deux enfants

Situation militaire : Service militaire effectué en tant que V.F.I. de 1990 à 1991

Adresse personnelle : 13, Chemin de la Cruvière  
30840 Meynes

Tél. 04 66 57 10 77 - Mobile : 06 62 24 40 81

Adresse professionnelle : Laboratoire de Génie Informatique et d'Ingénierie de Production (LGI2P)

Site EERIE de l'Ecole des Mines d'Alès (EMA)

Parc Scientifique Georges BESSE

30035 Nîmes Cedex 1 - France

Tél. 04 66 38 70 66 - Fax : 04 66 38 70 74

Courriel professionnel : Vincent.Chapurlat@ema.fr

Courriel personnel : Chapurlat.Vincent@neuf.fr

## B - DIPLOMES ET TITRES UNIVERSITAIRES FRANÇAIS

1994 **DOCTORAT** de l'Université des Sciences et Techniques du Languedoc Montpellier II  
Spécialité : Génie Informatique, Automatique et Traitement du Signal

Date de soutenance : 29 Septembre 1994

Mention Très Honorable

Directeur de thèse : Professeur François PRUNET

Membres du jury : Professeur B.Descottes-Genon, Professeur C.Tahon  
(Rapporteurs), Dr P.Lhoste, Dr J-P. Callet (Examineurs)

Titre : **ACSY-R: un modèle de spécification, conception et simulation de la commande de systèmes discrets complexes répartis**

1990 **Diplôme d'Etudes Approfondies** en Conception Assistée de Systèmes Informatiques, Automatiques et Microélectroniques - Mention Assez Bien - U.S.T.L. Montpellier II

1989 **MAITRISE** EEA - Mention Bien - U.S.T.L. Montpellier II

1988 **LICENCE** EEA - Mention Bien - U.S.T.L. Montpellier II

## C - ÉVOLUTION DE CARRIERE

Chronologiquement, ma carrière s'est déroulée en trois périodes, schématisées dans la Figure 1 :

- **Septembre 1991 à septembre 1994 : Doctorat de 3<sup>ème</sup> cycle** au Laboratoire d'Automatique et de Microélectronique de Montpellier (LAMM), devenu en 1992 le Laboratoire d'Informatique, de Robotique et de Microélectronique de Montpellier (LIRMM – UMR CNRS/Université Montpellier II). Ce Doctorat s'est déroulé sous la direction de M. le Professeur F.Prunet dans l'équipe 'Systèmes à Événement Discrets'.

- **Octobre 1994 à juin 1996 : Post Doctorat** au Laboratoire de Génie Informatique et d'Ingénierie de Production (LGI2P, Nîmes) de l'Ecole Nationale Supérieure des Techniques de l'Industrie et des Mines d'Alès (ENSTIMA ou EMA) sous la direction de Mme le Professeur Janine Magnier dans l'équipe 'Vérification et Systèmes Complexes'.

- **Depuis Juillet 1996 : Maître Assistant** à l'EMA et basé au LGI2P. J'ai passé le concours externe le 30 Avril 1996 et ai été nommé sur un poste de MA stagiaire le 1<sup>er</sup> Juillet 1996. L'arrêté de nomination sur un poste de MA 2<sup>ème</sup> classe est paru le 30 Juin 1997. Je suis passé en 1<sup>ère</sup> classe le 1<sup>er</sup> janvier 2003.

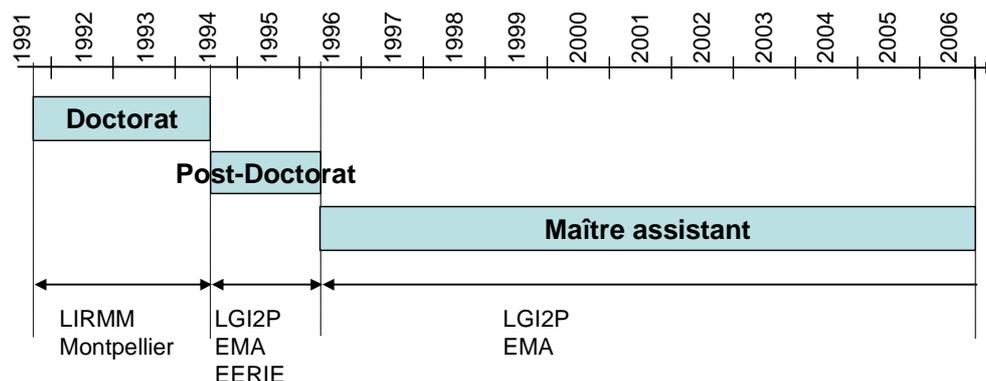


Figure 1 : Trois périodes

## **ACTIVITE D'ENSEIGNEMENT**

---

Ce chapitre fait le bilan de mon activité d'enseignant depuis 1991.

Il présente tout d'abord une chronologie rapide de cette activité, l'évolution des thèmes abordés et les publics concernés. Une répartition des types d'enseignement est donnée avant de synthétiser mes responsabilités administratives liées à l'enseignement.

### **A - THEMES ABORDES**

Je me suis impliqué dès 1991 dans une dynamique d'enseignement. J'ai participé entre 1991 et 1996 à de l'encadrement de TP, de TD et de cours sur des thèmes essentiellement tournés vers le domaine EEA : Electronique, Automatique linéaire et Automatique discrète.

A partir de 1996, je me suis impliqué dans le montage et l'encadrement de plusieurs cours nouveaux dans le cursus d'ingénieur de l'EMA en visant le domaine de la productique, de la modélisation et de l'analyse de modèles.

Depuis 2000, les thèmes enseignés se sont résolument recentrés autour de la productique, de la modélisation et de la vérification des modèles de systèmes complexes. Ils sont en effet directement impactés par l'activité de recherche présentée plus loin.

Les thèmes de ces enseignements ont ainsi évolué chronologiquement comme suit :

- **Automatique linéaire** : modélisation et analyse de systèmes du 1<sup>er</sup> et du 2<sup>ème</sup> ordre, Diagrammes (Bode, Nyquist, etc.), transformée de Laplace, transformée en Z, asservissement et boucle de régulation.
- **Génie automatique** : spécification des systèmes de contrôle commande, Grafcet et aspects méthodologiques autour du Grafcet, spécification et codage de systèmes temps réel embarqués, introduction aux réseaux locaux industriels et aux réseaux de terrain.
- **Modélisation de systèmes complexes pour la productique** : introduction à la systémique, modélisation d'entreprise (approches de modélisation fonctionnelle de type SADT, d'activités au moyen de la méthode GRAI, de processus - transfert des activités de recherche sur le thème -, de performance et de flux au moyen des Réseaux de Petri)

- **Productique** : méthodes d'audit de systèmes de production, approches SMED, KANBAN, 5S, Six Sigma et Lean Manufacturing, ordonnancement (approches d'ordonnancement classiques), stratégies MRP et Juste à Temps.
- **Modélisation de problème et recherche de pistes de solutions** dans le domaine technique en vue d'une innovation : méthode TRIZ.
- **Vérification et validation de modèle** : Les logiques (booléenne, logique propositionnelle, logique des prédicats, logiques temporelles), model checking (principes et outils), méthode de spécification formelle Z et theorem proving, méthode NIAM et analyse semi formelle.

## **B - PUBLICS CONCERNES**

J'ai participé aux activités de préparation, de montage, et de dispensation de cours, de TD et de TP dans le cadre de :

- **L'enseignement de formation universitaire** entre 1991 et 1994 à l'Université Montpellier II (TP de licence EEA), au CNAM (cours et TD en cycle probatoire) et de formation spécialisée en informatique à l'ESICAD (cours et projet).
- **L'enseignement de formation initiale d'ingénieur** à l'EMA et à l'EERIE entre 1994 et 1996 puis exclusivement à l'EMA depuis 1996. Les cours ont été dispensés en amphithéâtre en 2<sup>ème</sup> et en 3<sup>ème</sup> année devant la totalité de chaque promotion (en moyenne 140 élèves par année) et en 4<sup>ème</sup> année (20 à 25 élèves en moyenne). Les TD et TP ont été dispensés en quart de promotion soit 40 élèves en moyenne. J'ai encadré enfin plusieurs missions entrepreneuriales<sup>1</sup> en entreprise, mini missions<sup>2</sup> de recherche et de nombreux projets longs<sup>3</sup> qui sont des exercices pédagogiques destinés aux élèves de l'EMA.
- **L'enseignement en formation spécialisée**
  - en section de perfectionnement<sup>4</sup> à l'EMA depuis 1996,
  - en DEA puis en Master Pro et en Master Recherche à l'Université Montpellier II depuis 2003 et à l'Université de Savoie depuis 2004. Chaque promotion comptait en moyenne de 15 à 25 élèves.
- **Des activités de formation continue en milieu industriel.** Dans le cadre de séances de 3 jours chacune, 45 personnes de différents secteurs d'activité (nucléaire, consulting en produit et processus nouveaux, R&D de produits spéciaux, automobile, chimie et biotechnologies) ont été formées entre 2000 et 2006. En même temps, 30 personnes (du

---

<sup>1</sup> Une mission entrepreneuriale est un exercice pédagogique au cours duquel un industriel confie un problème à un groupe de trois élèves devant dans un délai de 5 semaines tenter de solutionner celui-ci quelle que soit la nature de ce problème : organisation de la production, création d'activité, création de produit nouveau ou audit de système de production.

<sup>2</sup> Un groupe de trois élèves travaillent durant une semaine sur un sujet volontairement ciblé proposé par un enseignant chercheur et relevant d'une problématique de recherche.

<sup>3</sup> Un projet long mixe un aspect recherche et un aspect applicatif dans lequel un groupe d'élèves s'investit durant plusieurs mois à raison d'un jour par semaine en moyenne.

<sup>4</sup> Section destinée à accueillir en formation continue un groupe d'élèves motivés possédant déjà une expérience industrielle de 5 ans minimum et d'un niveau de diplôme au moins égal à bac + 2.

laboratoire R&D du groupe AREVA et certains industriels régionaux) ainsi qu'une grande partie des enseignants chercheurs du LGI2P ont été sensibilisés à la problématique de la modélisation de système en vue de la résolution de problème.

## C - REPARTITION

La Figure 2 montre comment se répartissent, depuis 1996 et en heures équivalent TD, les cours, les travaux dirigés et les travaux pratiques dispensés et encadrés ainsi que le nombre total d'heures d'enseignement en présentiel chaque année.

Cette répartition montre une assez forte proportion de cours de 1996 à 2000. En effet, j'ai mis en place des enseignements, développé des supports pédagogiques et monté des projets expérimentaux grandeur nature totalement nouveaux dans le cadre de la formation à l'EMA.

Comme évoqué en préambule, c'est la recherche que j'ai cherché à favoriser. Ainsi, à partir de septembre 2000, j'ai choisi de limiter cette activité d'enseignement pour me consacrer pleinement à cette recherche et au projet d'HDR. A partir de 2003/2004, j'ai été appelé à intervenir de plus en plus en enseignement en Université. La part des cours dispensés en interne (EMA) et en externe (Université) tend aujourd'hui à s'équilibrer après une activité un peu exceptionnelle en 2005.

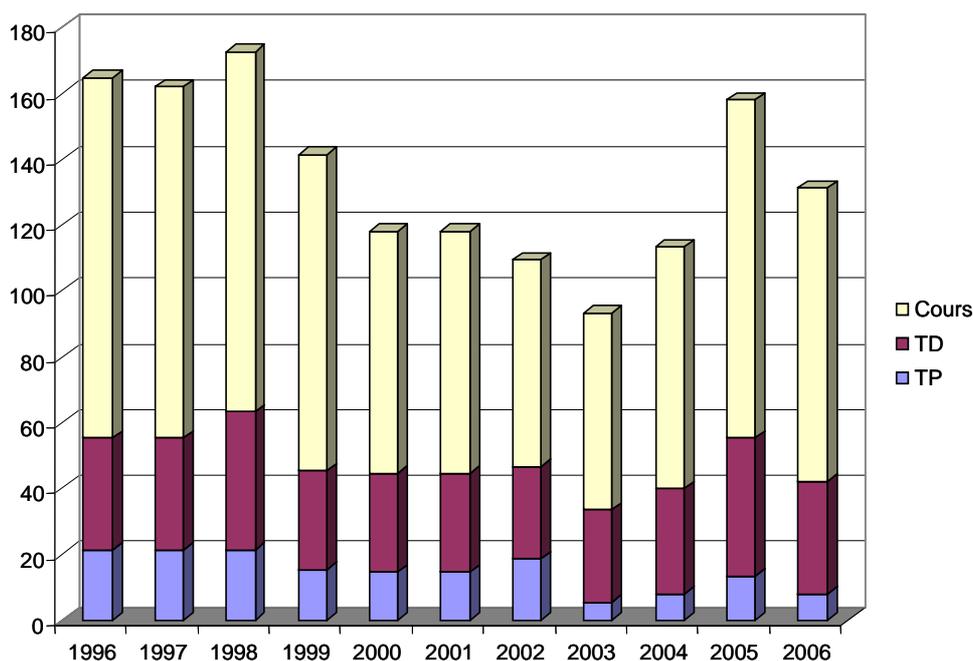


Figure 2 : Répartition Cours / TD / TP (en heures équivalent TD)

L'annexe B (page 132) précise année par année quels étaient les publics visés, les durées effectuées et l'intitulé précis de chacun de ces enseignements.

## D - RESPONSABILITES ADMINISTRATIVES

La Figure 3 synthétise les différentes responsabilités liées à l'activité pédagogique depuis 1991.

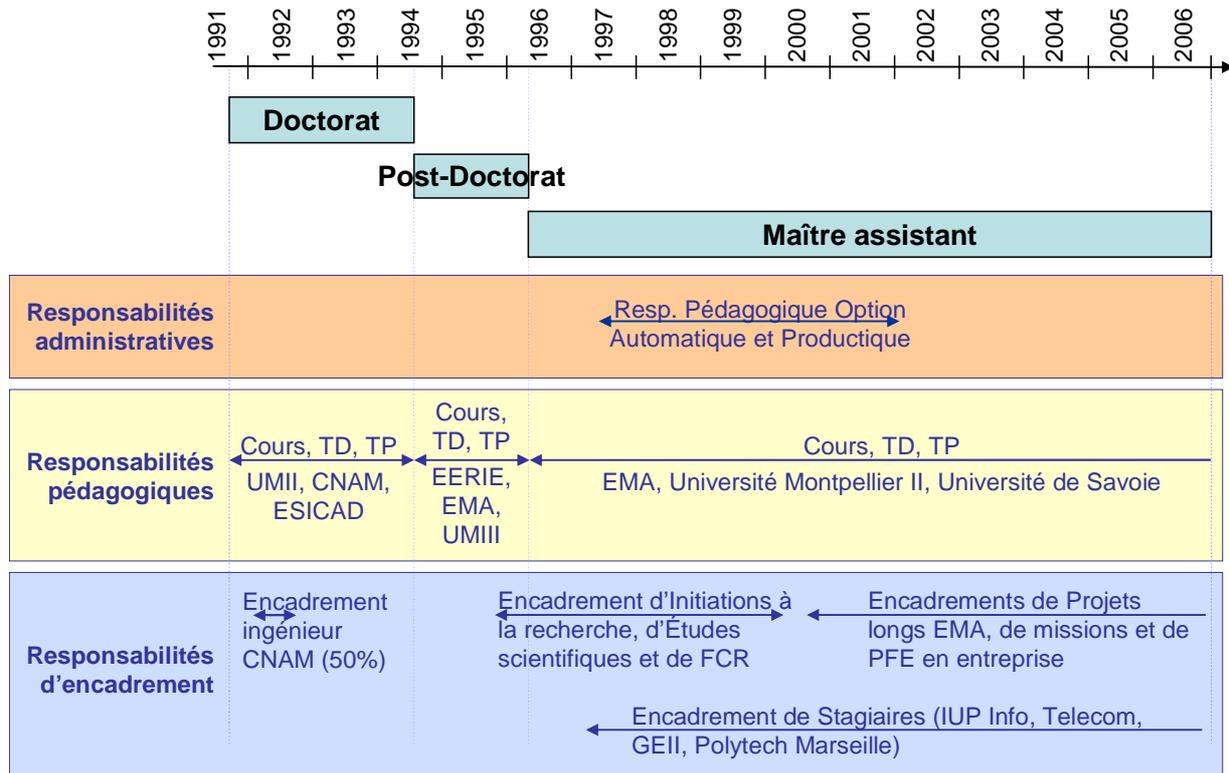


Figure 3 : Synthèse des responsabilités liées à l'enseignement

En particulier, outre l'organisation, le montage et la diffusion d'enseignements nouveaux, j'ai été Responsable Pédagogique de la filière 'Automatique et Productique' de 4<sup>ème</sup> année de formation initiale et de formation complémentaire de l'EMA de 1997 à septembre 2000.

Cela recouvre les responsabilités tant d'organisation et d'ingénierie pédagogique, que les responsabilités administratives et d'organisation liées à la scolarité elle-même : choix des intervenants, planification des cours, suivi des élèves en entreprise, etc.

Cette expérience significative m'a donnée l'occasion :

- De mieux cerner les besoins pédagogiques (tant du point de vue théorique qu'applicatif) du domaine de la productique et de l'automatique en entreprise. Cela a permis ainsi de faire des propositions et d'adapter quand cela s'avérait nécessaire la formation d'ingénieur généraliste et entrepreneur tel qu'il est envisagé à l'Ecole des Mines d'Alès.
- De prendre le recul nécessaire et d'innover dans la pédagogie. Cela m'a permis par exemple d'initier et de mener à bien la construction et la diffusion d'un benchmark d'entreprise baptisée SCR (Société Cévenole de Roulements). Cette entreprise s'inspire de nombreuses entreprises régionales avec lesquelles j'ai été amené à collaborer dans le cadre de la recherche ou dans le cadre de travaux d'élèves. Elle est décrite au travers de modèles d'entreprise et d'applicatifs développés à cette occasion. Ceux-ci mettent à disposition des enseignants comme des élèves tous les éléments descriptifs du fonctionnement de l'entreprise, de son organisation, de ses ressources, de ses objectifs et de son marché. L'ensemble est destiné à supporter l'enseignement global de la productique à l'EMA et particulièrement au sein de l'option automatique et productique. Le travail engagé est en cours de transfert vers la recherche puisqu'il servira de démonstrateur dans le cadre de la thèse de Mlle Y. Ben Zaïda (voir page 92).

- De parfaire un certain nombre de compétences en organisation, en écoute et en gestion des personnes.
- De monter et de mettre en place une collaboration avec la Société Bäurer pour la mise à disposition de licences de l'ERP baptisé 'B2' qui a servi de base à l'enseignement et à l'expérimentation pour les cours de gestion de production, de systèmes d'information industriels et sur la modélisation de processus.
- D'encadrer des stagiaires, autour des thématiques de l'option que je dirigeais, afin de monter divers TP et exercices. Ces stagiaires sont répertoriés dans le Tableau 1.

<b>Année</b>	<b>Nom et titre</b>
1999	IUT Réseaux et Télécommunication Nîmes, Programmation d'un serveur automatique sur Internet
1998	IUT GEII Nîmes, Modélisation et programmation d'une Partie Opérative en vue du montage d'un TP de Grafset
1997	IUT GEII, Nîmes : Remise en œuvre, câblage et programmation d'une machine de soudage en vue du montage d'un TP Réseau

Tableau 1 : Encadrements de stagiaires à des fins pédagogique

- D'initier enfin l'enseignement en langue anglaise dans cette filière 'Automatique et Productique' courant 2000 afin de faire migrer cette formation vers une structure de Master Of Sciences dès la rentrée de septembre 2001. Cela a nécessité d'abord d'organiser et de gérer une formation externalisée à l'anglais pour l'ensemble des enseignants-chercheurs impliqués dans cette filière. Il a fallu ensuite organiser et piloter cette mutation.

## **ACTIVITE DE RECHERCHE**

---

Ce chapitre fait le bilan de mon activité de chercheur. Il tente de montrer et de justifier la cohérence et la qualité des résultats obtenus depuis 1991 tout en se positionnant vis-à-vis de la communauté.

Pour cela, je me suis impliqué dans une thématique de recherche qui est présentée dans la première partie et dont la formulation s'est évidemment affinée au cours du temps. La deuxième partie montre quelles sont les perspectives et le projet de recherche que je propose de développer maintenant à court et à moyen terme.

### **A - THEMATIQUE : PRESENTATION ET MOTIVATIONS**

Les objectifs comme la finalité fixés à cette recherche depuis le début du Doctorat en 1991 relèvent d'une thématique que je présente dans la suite sous la forme de deux séries de questions/réponses.

#### **1 - MODELISATION**

La première question posée est : 'que faire pour mieux comprendre et appréhender un système complexe ?'.

Selon [Lemoigne 1990], *un phénomène perçu complexe, donc irréductible à un modèle déterminant la prévision certaine de ses comportements, se représente par un système*. La notion de système est donc vue comme une représentation. Nous utiliserons cette notion de système, et le qualifierons de système complexe [Morin 1990, Genelot 1998] pour décrire quelque chose (une organisation, un objet naturel ou artificiel) dont le comportement, la structure et les fonctions sont difficiles à comprendre par de nombreux aspects synthétisés dans la Figure 4 [Hutzler 2000] :

- **Sa composition** : Un système complexe est constitué d'un ensemble de composants<sup>5</sup> (ou sous-systèmes) de nature éventuellement hétérogène et relevant de domaines de connaissances différents et transdisciplinaires, possédant des caractéristiques et des propriétés propres, et, enfin, par un effet d'échelle, pouvant eux-mêmes être considérés comme complexes.
- **Il est le siège d'interactions entre ses sous systèmes** : Ces interactions font apparaître des propriétés qui caractérisent, non pas chaque composant pris isolément, mais bien la globalité du système : *le tout est plus que la somme des parties*.
- **Il est le lieu d'émergence de phénomènes nouveaux** : Les sous-systèmes sont souvent autonomes et dotés de caractéristiques leur permettant d'évoluer isolément les uns des autres par apprentissage et/ou auto-organisation [Morin 1990] sous l'action combinée de l'environnement et des autres sous-systèmes. Globalement, cette transformation est permanente et naturelle : *un système qui fonctionne est un système qui s'use et se transforme*. Cette dynamique d'évolution de chaque sous-système se concrétise au travers de la modification de ses caractéristiques de temps, d'espace et de forme, de son comportement, de son fonctionnement, etc. De nouvelles interactions entre les sous-systèmes deviennent possibles. De nouvelles propriétés et de nouveaux comportements émergent alors au niveau du système englobant. Ils sont a priori imprévisibles et méconnus, ne peuvent être anticipés. Ils peuvent entraîner la dé-maîtrise du système par ses futurs utilisateurs en faisant apparaître de nouveaux états du système. Ces états peuvent être stables, auquel cas le comportement peut devenir reproductible. Ils peuvent aussi être instables auquel cas le comportement devient aléatoire, fugitif et d'autant plus difficilement explicable et compréhensible. Ces phénomènes émergents peuvent alors s'avérer indésirables et nuisibles car non prévus.

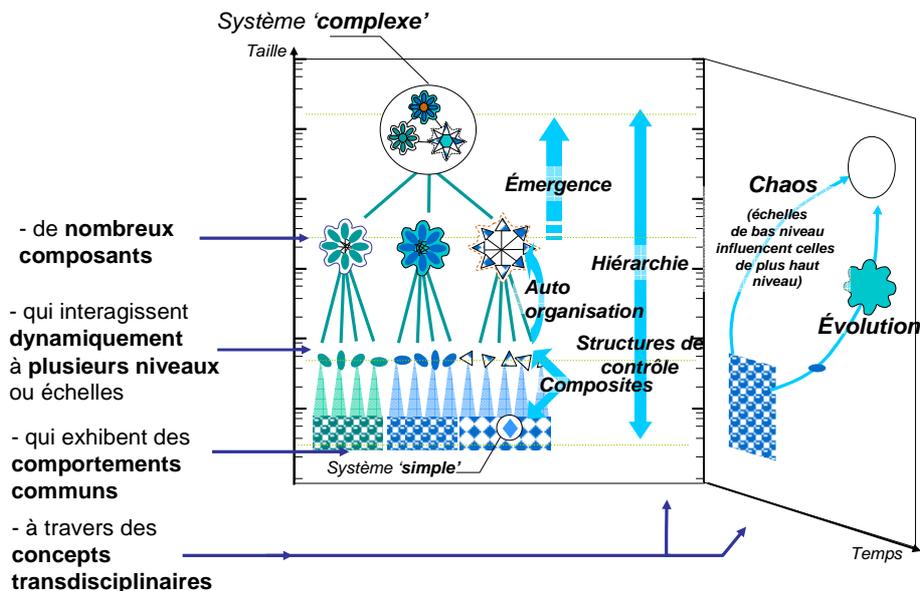


Figure 4 : Synthèse d'une caractérisation d'un système complexe [Hutzler 2000]

<sup>5</sup> Le nombre de composants n'est pas suffisant pour définir la complexité. Par contre, dans le cas de système à forte composante logicielle, électronique ou autre, l'emploi de technologies offrant des fonctionnalités plus nombreuses, devenant intégrables plus facilement par la miniaturisation qui est permise, etc. est un facteur aggravant de la complexité.

- **Son état est difficile à définir** à un moment donné de son **cycle de vie** : Il peut être en effet difficile d'acquérir cette connaissance pour des raisons techniques, géographiques, de disponibilité ou de temps. Il peut aussi être simplement insensé de l'acquérir car le coût d'acquisition en devient prohibitif. Enfin, ce sera de toute manière une information partielle et donc incomplète.

Plusieurs constats sont nécessaires.

Tout d'abord, l'hypothèse d'irréductibilité d'un système complexe à un modèle unique est donc justifiée à plus d'un titre. Un modèle est en effet une abstraction, un filtre de la réalité qui ne rend compte que d'une partie de la connaissance relative au phénomène étudié et qui masque nombre de détails considérés comme superflus ou sans intérêt lors de la modélisation. Nous cherchons en effet toujours à abstraire une réalité pour la comprendre même si c'est au prix d'hypothèses simplificatrices très réductionnistes.

Il faut pouvoir approcher le système en tenant compte de plusieurs points de vue et/ou sous divers angles. Ce n'est réellement plus un modèle unique mais un ensemble de modèles complémentaires les uns des autres qui doivent être élaborés. Le groupe d'acteurs qui a la charge de ces modèles dans le cadre d'un projet<sup>6</sup> s'appuiera ensuite sur eux pour prendre et argumenter une décision soit de pilotage soit de conception d'un système. Cette approche multi vues permet d'améliorer la compréhension et le niveau de connaissance que ces acteurs ont sur ce système. Elle permet ou doit permettre ensuite de raisonner et d'investiguer des faits, des idées et des hypothèses. Elle fournit enfin les éléments de connaissance nécessaire pour communiquer avec d'autres acteurs, et pour argumenter des actions proposées. Il existe alors différents types de modèles dont [Sagace 1999] en propose une synthèse donnée Figure 5 en les caractérisant en fonction des usages et des objectifs des acteurs.

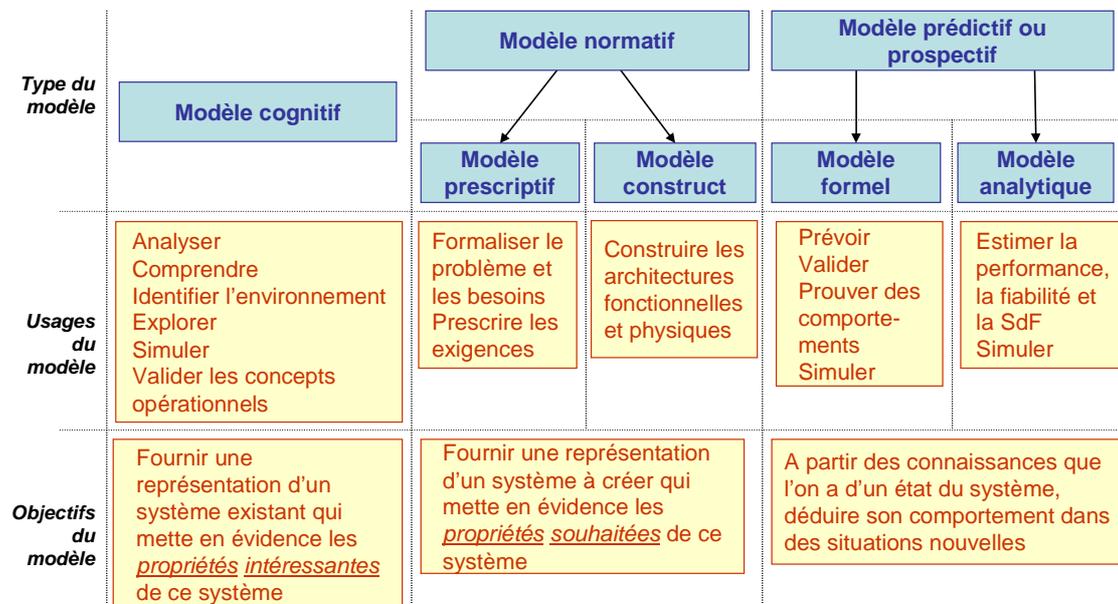


Figure 5 : Typologie et objectifs des modèles [Sagace 1999]

<sup>6</sup> La notion de projet est vue ici telle qu'elle est définie dans le cadre GERAM [GERAM 1999]: un projet est une suite d'activités, allant de la spécification du projet jusqu'à son exécution et son arrêt, ayant pour objectif la conception, l'amélioration, le pilotage, le démantèlement, etc. d'un système au sein de l'entreprise.

Ensuite, la modélisation elle-même nécessite une conceptualisation, une formalisation permettant d'appréhender la complexité du système. L'approche Systémique [Le Moigne 1990, Durant 2004, Mayer 1995, Braesch 1995] est le fruit de cette étape de conceptualisation.

Un résultat synthétisant les travaux menés autour de cette approche est le cadre de modélisation système SAGACE [Penalva 97, Sagace 1999, Feliot 1997] représentée dans la Figure 6.

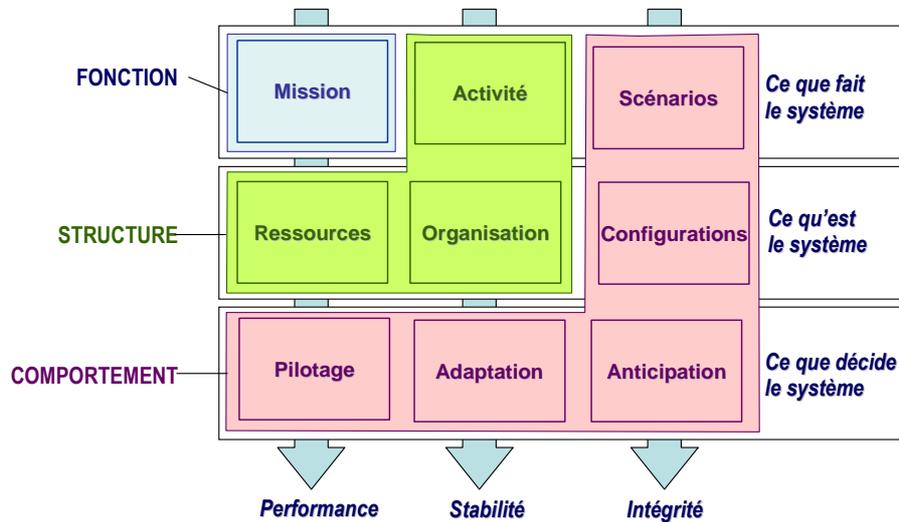


Figure 6 : La grille SAGACE

Ce cadre de modélisation se présente sous la forme d'une grille composée de 9 cases regroupées en 3 vues :

- **Vue fonction** : Que doit faire le système dans son environnement ? Quels sont sa finalité, sa mission et ses objectifs ?
- **Vue structure** : De quoi le système est-il fait ? Avec quelles ressources, quelles configurations et quelle organisation le système fonctionne-t-il ? Comment est-il structuré dans son activité pour remplir sa mission ?
- **Vue comportement** : Quelle est la dynamique du système ? Comment le système évolue-t-il ? Comment passe-t-il d'un type de fonctionnement à un autre ? Quels sont les différents scénarios possibles de son évolution ? Quelles sont les conditions et configurations des ressources du système permettant de passer d'un scénario au suivant ? Comment est-il piloté à la fois pour atteindre ses objectifs de performance, et pour faire face à un changement pour s'adapter, s'améliorer, faire face à des incidents, etc. ?

Chaque case représente alors un point de vue donné du système. Elle est étroitement liée et cohérente avec chacune de ses voisines par le respect de règles normatives.

La vue Fonction se focalise sur le point de vue unique 'quoi ?' et non sur le comment du système.

La vue Structure est composée des trois points de vue 'Activités' ou 'programmes', 'Organisation' ou 'réseau logistique' et 'Ressources'.

Enfin, la vue Comportement est composée des 5 points de vue 'scénarios', 'configuration' et, en particulier, les modes de 'pilotage', 'd'adaptation' et 'd'anticipation' dont le système dispose pour pouvoir rester :

- **Performant** : La performance est la qualité traduisant l'aptitude du système à atteindre ses missions. Elle caractérise la relation entre les fonctions à remplir par le système et la conformité du service effectivement rendu par les ressources par exemple au travers d'indicateurs de délai, de qualité et de coûts traduisant l'efficacité, l'efficacité et la pertinence des ressources mises en jeu [Bonnefous et al. 2001].
- **Stable** : La stabilité est la qualité traduisant l'aptitude du système à maintenir sa viabilité et à s'adapter à un environnement mouvant. Elle caractérise la relation de cohésion qui doit exister entre la structure du système (son organisation) et ses activités ou programmes qui définissent ce que le système doit faire.
- **Intègre** : L'intégrité est la qualité traduisant l'aptitude du système à revenir à un mode de fonctionnement connu en cas de modification d'une configuration existante par perte d'une ressource par exemple ou d'un scénario encore non envisagé comme une situation émergente. Elle caractérise la relation qui doit exister entre le comportement et la cohérence, si possible à tout instant, du système.

Chaque point de vue est décrit à l'aide d'un ou de plusieurs modèles hiérarchisés. Ce sont bien ces modèles qui nous intéressent ici car ils sont les différents grains de connaissance qu'il faut posséder pour mieux comprendre le système. Chacun d'eux est une instance d'un langage de modélisation<sup>7</sup>.

SAGACE fournit par défaut un langage de modélisation unique basé sur la notion de processeur générique et de liens dont l'utilisation et l'interprétation dépendent du contexte, c'est-à-dire du point de vue dans lequel ils sont mis en œuvre. Il reste difficile pour un modeleur d'utiliser un langage unique de modélisation pour couvrir les besoins de modélisation de chaque vue et d'en faire comprendre ensuite le contenu et le sens à d'autres utilisateurs non initiés. De plus, ce langage, volontairement générique et donc relativement pauvre, ne permet pas de rendre compte aisément de certaines entités de modélisation manipulables au moyen de langages de modélisation dédiés et plus riches. Il peut donc s'avérer nécessaire d'utiliser ces langages plus appropriés ou simplement plus usuels pour le modeleur comme pour son entourage.

Enfin, le rôle du modeleur est important. En effet, la modélisation est :

- **Guidée nécessairement par l'objectif** que se fixe le modeleur<sup>8</sup> (pour faire quoi ?). Par exemple, il peut s'agir de réaliser un modèle de simulation, un modèle de pilotage, un jeu d'essai, un modèle conceptuel de données ou autre [Jagdev 1995]. Le rôle de modeleur n'est

---

<sup>7</sup> Un langage de modélisation est un ensemble de symboles et de règles de composition de ces symboles : il possède donc une syntaxe abstraite qui fixe un certain vocabulaire, une syntaxe concrète qui fixe sa sémantique et des règles d'écriture. Un langage de modélisation ne possède pas obligatoirement une sémantique dite opérationnelle qui décrit comment le résultat de la modélisation, i.e. le modèle, doit se comporter pour rendre compte de l'évolution du phénomène modélisé. Enfin, respectant l'approche MDA (OMG 2003, Bezivin 2001), un langage de modélisation est une instance d'un méta méta modèle (ou méta langage) et un modèle est une instance d'un langage de modélisation.

<sup>8</sup> Acteur humain en charge de la modélisation donc manipulant les langages de modélisation et les modèles (instances des langages de modélisation).

donc reconnu et justifiable que s'il sert directement un objectif de l'entreprise : décider une amélioration ou une action, agir, tester des alternatives, communiquer et convaincre, argumenter et comparer, piloter le fonctionnement ou le changement.

- **Facilité par le niveau de connaissance** du modéleur sur ce qu'il doit réellement représenter (quoi ? qu'est ce qui est pertinent ? où s'arrêter ? à quel niveau de détail ? sous quelles hypothèses ?).

- **Rendue possible** par la maîtrise qu'il possède d'une démarche, de langages de modélisation adaptés tant du point de vue du formalisme qu'il propose (textuel ou graphique) que du point de vue du niveau de formalisation qu'il permet (du langage naturel aux langages mathématiques sans ambiguïté), des outils de représentation associés et, quand c'est possible ou quand ils existent, de cadres de modélisation ou de modèles de référence dans lequel il s'intègre ou avec lesquels il cohabite.

- **Limitée** par le temps et les moyens dont ce modéleur dispose.

***Le travail de recherche a porté sur la formalisation et le développement de la modélisation de systèmes complexes et, en particulier depuis 1997, de systèmes de type entreprise.***

## **2 - VERIFICATION, VALIDATION, QUALIFICATION ET CERTIFICATION (VVQC)**

La question est alors multiforme : comment améliorer la confiance dans les modèles ? Comment améliorer la pertinence de ces modèles vis-à-vis des exigences et du système modélisé ?

Comme dit plus haut, un modèle sert à comprendre, à raisonner, à communiquer avec d'autres acteurs et finalement à bâtir une argumentation dans le cas d'une prise de décision. Il est nécessaire dans une activité de (re)conception, de réalisation, de simulation, de conduite, de formation d'opérateurs, de test et de comparaison d'alternatives de solution (quel que soit le problème à résoudre : pilotage, technique, organisationnel, autre). Chaque activité d'un projet et chaque objectif, et de fait chaque modéleur, est donc à l'origine de modèles différents et spécifiques. Il est donc primordial :

- **De s'assurer**, ou à défaut de se rassurer si cela s'avère suffisant, de la 'qualité'<sup>9</sup> du modèle c'est-à-dire de :

- Sa **complétude** : le modèle contient toute l'information nécessaire qui peut être utilisée pour démontrer ou infirmer sans ambiguïté ni doute la véracité d'une affirmation.
- Sa **cohérence** : il n'existe pas de contradiction dans l'information contenue dans un ou plusieurs modèles. La cohérence d'un modèle est donc définie par l'impossibilité de trouver deux informations contradictoires ne permettant pas d'aboutir à la décidabilité d'une affirmation. La cohérence entre plusieurs modèles revêt plusieurs caractéristiques selon que l'on se place à l'intérieur d'une vue ou entre des vues

---

<sup>9</sup> Selon l'ISO 8402.94, la qualité est « l'ensemble des caractéristiques d'une entité qui lui confèrent l'aptitude à satisfaire des besoins exprimés et implicites ».

voisines. A l'intérieur d'une même vue, les modèles participent chacun à la description de la décomposition (physiologique ou organique donc d'un niveau de détail fonctionnel, comportemental, topologique ou structurel du système) ou à la description par substitution d'un comportement par exemple. Dans le cas de la décomposition, le même langage de modélisation est généralement employé. La cohérence est donc définie par l'impossibilité de trouver deux informations contradictoires entre un modèle  $M_1$  et les modèles  $M_{1,i}$  issus de la décomposition de  $M_1$ . Par exemple, la décomposition d'un comportement doit se faire à entrée/sortie identiques. Dans le cas de la substitution, différents langages peuvent être utilisés et on parle alors de réécriture totale ou partielle. La cohérence se définit alors comme la non contradiction de ces différents modèles. Elle nécessite donc de tenir compte de la sémantique propre des objets de modélisation utilisés pour bâtir chaque modèle. Quand l'on cherche à établir la cohérence entre différentes vues, le problème est sensiblement plus élaboré puisque l'on change de langage et de principes de modélisation. La cohérence entre les modèles de différentes vues se définit alors au moyen de règles de construction ou règles normatives devant être respectées pour éviter toute contradiction. Cependant, ces règles normatives restent souvent d'un niveau très général et abstrait. Ces différentes propositions de définition de la cohérence sont assez proches de la définition de consistance sans toutefois être totalement équivalentes. Consistance signifie en effet que l'on ne peut pas démontrer à la fois quelque chose dans un modèle et son contraire. Comme défini plus loin, la cohérence étant une caractéristique des modèles, elle est un objectif de vérification.

- Sa **pertinence** : Un modèle est pertinent s'il représente le système avec une qualité suffisante. Il faut bien entendu relativiser ce niveau de qualité en tenant compte des hypothèses simplificatrices imposées par les langages de modélisation ou l'approche de modélisation choisie. De plus, le modelleur peut être un utilisateur cible ou un concepteur du système et donc posséder des objectifs différents. L'utilisateur cible décrira le système selon une approche boîte noire et spécifiera les exigences fonctionnelles et non fonctionnelles du système vis-à-vis de son environnement. Le concepteur adoptera une approche boîte blanche pour aboutir à une spécification de conception du système en terme de solution technologique. La pertinence nécessite donc de s'assurer que le modèle répond aux objectifs du modelleur (complétude vs. intérêt) et qu'il est manipulable sans introduire d'ambiguïté ou de biais (complétude vs. fidélité). C'est un but à la fois de vérification de la construction et de validation de chaque modèle.

- **De pouvoir juger des forces et des faiblesses** du système modélisé. Cela concerne la performance [Berrah 1997], la stabilité dans le temps (est-il possible, suite à une situation imprévue, de revenir vers un fonctionnement maîtrisé ou vers une situation de routine [Montmain et al. 2006]) et d'intégrité (comment le système anticipe-t-il et évolue-t-il pour s'adapter à de nouvelles situations ?). Des techniques de validation telles que la simulation et l'expertise sont alors utilisées pour analyser le système en cause au travers de ses modèles.

Que faire alors s'il s'agit d'un système complexe dont personne ne peut a priori décider si la représentation est 'bonne' ou 'mauvaise' en tout cas pour l'usage qui va en être fait ?

Il y a évidemment plusieurs difficultés pour s'assurer ou à défaut se rassurer du 'niveau de qualité' d'un modèle.

Tout d'abord, prouver la complétude d'un modèle reste dans l'esprit un vœu pieux. Il ne peut exister a priori un modèle unique (ou unifié) décrivant la réalité d'un système sans adopter un point de vue ou un mode de filtrage de la connaissance relative à cette réalité. La complétude devrait donc être examinée seulement pour ce point de vue ou ce filtre. Mais même dans un point de vue donné, un oubli est possible. Il peut s'agir d'un oubli objectif dû au choix du modéleur qui considère certaines connaissances sans intérêt ou trop difficiles à décrire précisément. Il peut s'agir d'un oubli subjectif, c'est-à-dire un blanc dans une spécification, une redite mal formulée, une sur spécification douteuse ou une ambiguïté. Cela peut par exemple être dû à la méconnaissance de certaines caractéristiques de l'environnement d'évolution du système et des situations complexes [Le Moigne 1990, Montmain 2006] dans lesquelles ce système peut être amené à évoluer. Il devient alors souhaitable de faire émerger, tôt ou tard, cette connaissance car elle permettra de mieux comprendre certains effets indésirables et imprévisibles. Cette émergence peut alors permettre d'améliorer le modèle du système, de le rendre plus robuste et plus pertinent.

Ensuite, comme proposé plus haut, décrire un système passe par la construction de plusieurs modèles. Cela peut nécessiter de mettre en œuvre plusieurs méthodes et langages de modélisation ou encore des outils s'avérant, au final, incapables de communiquer entre eux sans une perte notoire ou une mauvaise interprétation, donc des incohérences d'informations de modélisation. On voit ici apparaître la problématique de l'interopérabilité tant au niveau des langages de modélisation, que des modèles ou des outils de modélisation. Enfin, manipuler un langage ou utiliser un outil nécessite des compétences de mise en œuvre. Si celles-ci sont imparfaites, le modèle sera inévitablement entaché d'erreurs à la fois de modélisation et d'interprétation de la réalité. Si cela ne peut pas être considéré à tout coup comme un écueil, cela peut parfois s'avérer dramatique selon le type ou l'usage futur de ce modèle.

Enfin, un modèle pris isolément doit être lui-même cohérent et rendre compte des exigences fonctionnelles et non fonctionnelles pour lesquelles le modéleur a bâti ce modèle. Celles-ci sont liées aux attentes et aux usages souhaités des utilisateurs finaux. Elles dépendent aussi des contraintes architecturales, de fonctionnement, de sûreté, de déploiement, etc. du système modélisé. Elles reflètent enfin des solutions technologiques éventuellement existantes qu'il faut intégrer ou avec lesquelles le système devra cohabiter, dans la recherche de performance, de stabilité et d'intégrité durant tout ou partie du cycle de vie du système, etc. Certaines exigences peuvent être antagonistes selon l'étape du cycle de vie du système, être considérées comme prioritaires par rapport à d'autres, être susceptibles d'évoluer et de se formuler différemment au cours du temps.

Nous pouvons donc définir dans un premier temps ces notions de vérification et de validation puis de les situer plus largement comme des tâches à mener à bien au sein d'une activité dans un projet tel qu'il est défini dans [GERAM 1999].

La **Vérification** cherche d'abord à répondre à la question « *Construisons-nous correctement le modèle ?* ». Le but est de prouver la cohérence du modèle, de s'assurer de la bonne utilisation des moyens de modélisation et de rendre compte de la description des exigences qui ont prévalu à l'existence de ce modèle. Par définition, la vérification est "*la confirmation*

par examen et apport de preuves tangibles (informations dont la véracité peut être démontrée, fondée sur des faits obtenus par observation, mesures, essais ou autres moyens) que les exigences spécifiées ont été satisfaites" (ISO 8402). Par exigences, on entend donc ici :

- les exigences fonctionnelles et non fonctionnelles du système modélisé,
- les exigences de construction syntaxique et sémantique imposées par le langage de modélisation (respect des règles de construction, de la syntaxe abstraite et de la syntaxe concrète, respect de la sémantique liée aux concepts et aux relations employés dans le langage de modélisation, respect de la sémantique opérationnelle quand elle existe).

La **Validation** cherche à répondre à la question « *Construisons-nous le bon modèle ?* ». Il s'agit ici de s'assurer de la pertinence du modèle, voire si possible d'une certaine forme de complétude au regard du système modélisé, de ses situations et de ses scénarios d'évolution. La validation se définit comme la "*confirmation par examen et apport de preuves tangibles que les exigences particulières pour un usage spécifique prévu sont satisfaites. Plusieurs validations peuvent être effectuées s'il y a différents usages prévus*" (ISO 8402). Ainsi, la validation permet de lier le modèle à la réalité attendue ou perçue.

Enfin, il est parfois intéressant de qualifier voire de certifier un modèle donné. Le but est alors de pouvoir réutiliser ce modèle en interne comme un modèle de référence de type métier partageable avec d'autres acteurs ou de prouver sa compliance avec un standard du marché. Ces deux tâches de qualification et de certification seront abordées plus précisément par le projet de recherche proposé page 96. Elles sont, dans l'état actuel de cette recherche, définies comme suit.

La **Qualification** consiste à s'assurer que le modèle peut servir de base à la communication sans ambiguïtés ni interprétation parasite possible entre les activités du projet et/ou entre les acteurs d'un groupe de travail.

La **Certification** consiste à s'assurer que le modèle respecte une norme et peut servir de base à l'établissement d'un référentiel réutilisable et générique à un domaine. Cela sous-entend la nécessaire implication et la responsabilité d'un organisme tiers qui reconnaît la pertinence, la rigueur, l'intérêt du modèle et garantit ces qualités lors de sa diffusion.

La Figure 7 resitue ces tâches de Vérification, Validation, Qualification et Certification (VVQC) dans une activité au sein d'un projet. Elles sont nécessaires entre la tâche de modélisation (de tout ou partie du système, du problème à régler, du phénomène considéré pour l'objectif de l'activité : simulation, analyse de données, etc.) et la tâche de décision/action.

Cette figure met en avant l'encapsulation existant entre la vérification, la validation, la qualification et la certification. Il est en effet difficile de valider un modèle qui ne soit pas correctement construit donc vérifié et dont on n'a pas au préalable vérifié l'adéquation ou la conformité avec les modèles et exigences issus des étapes précédentes du projet. De même la qualification de ce modèle ne peut s'envisager que s'il est à son tour validé et donc si sa pertinence et son usage dans un domaine s'en trouve justifiés. Enfin, la certification laisse penser qu'un modèle doit d'abord être qualifié en interne.

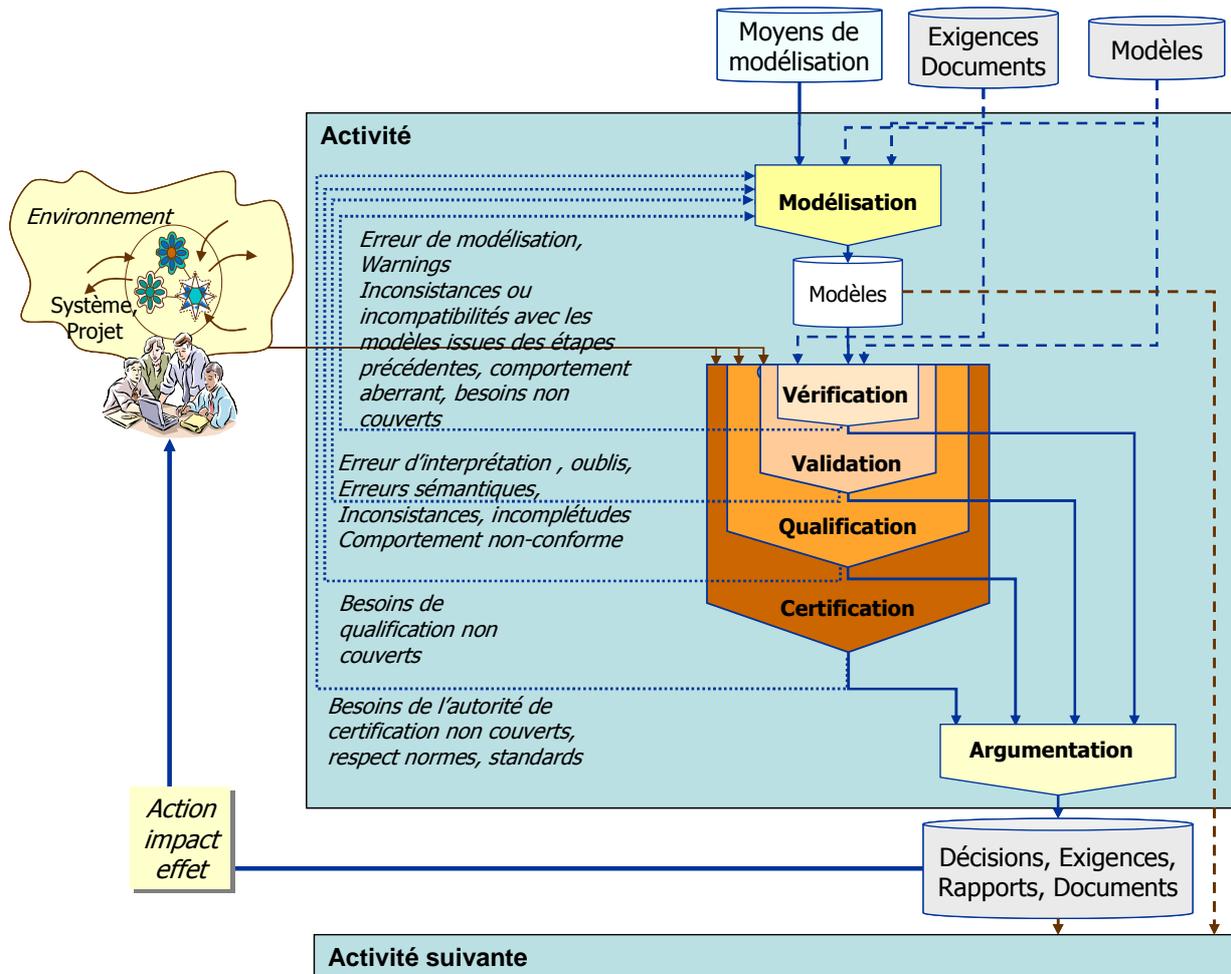


Figure 7 : Une activité au sein d'un projet (Modélisation / VVQC / Décision et Action)

Si l'on s'intéresse donc pour l'instant seulement aux tâches de vérification et de validation (V&V), il existe de nombreuses techniques selon :

- Le type et la dynamique du système : technique, socio technique, artificiel ou naturel, produit, procédé ou processus avec des dynamiques d'évolution de type temps réel, transactionnel ou hybride.
- Les modèles correspondant à des points de vue et des objectifs donnés, d'un certain niveau de formalisation.
- L'objectif réel et l'usage qui doit en être fait à des moments particuliers du cycle de vie, c'est-à-dire pendant une activité particulière au sein d'un projet, et sous des contraintes de mise en œuvre particulières (contraintes environnementales, financières, opérationnelles, de criticité, etc.).

Trois critères de classification peuvent ainsi être retenus comme le montre la Figure 8 :

- **La technique** est-elle plutôt considérée comme une technique de vérification ou de validation ?
- **La focalisation** de cette technique : se focalise-t-elle sur un aspect statique et descriptif, c'est-à-dire sans prise en compte de l'évolution dans le temps ? au contraire, se focalise-t-elle sur la dynamique du système étudié auquel cas l'animation du modèle, son

exécution et l'étude de la réponse du modèle à des séquences d'événements doit être faisable ?

- **Le niveau de formalisation** de la technique : est elle construite sur une base formelle, semi-formelle ou, au contraire, non formelle ? nécessite-t-elle la réécriture du modèle à vérifier ou à valider vers un modèle tiers vérifiable ? quelles sont alors les hypothèses limitatives induites par cette réécriture ?

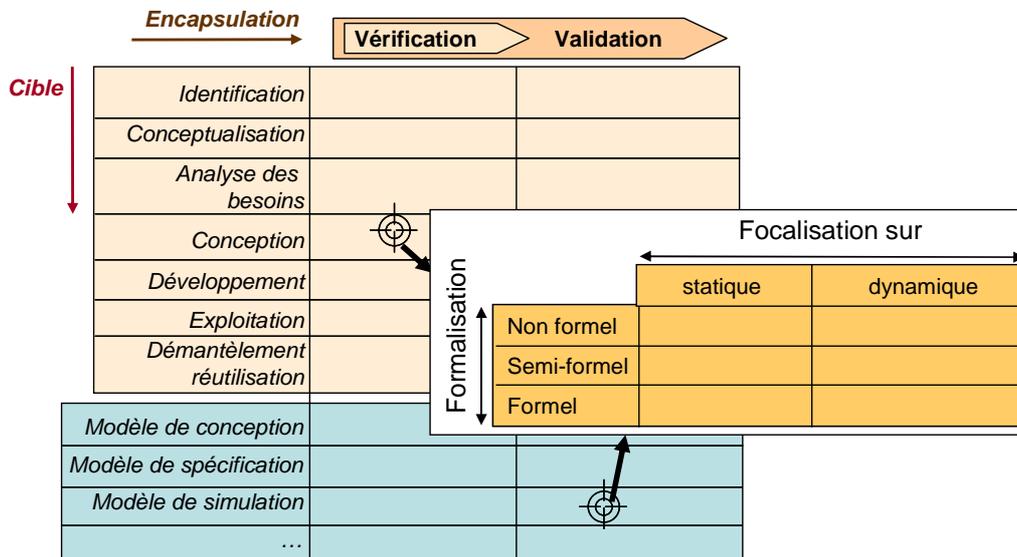


Figure 8 : V&V en fonction de l'étape du projet et/ou de l'objectif du modèle

On distingue ainsi :

- **Des techniques non formelles** : elles consistent à détecter des erreurs ou ce qui semble l'être en examinant et expertisant le modèle de manière manuelle au cours d'expertises, de revues de modèles, de test, etc. Ce sont donc plutôt des techniques de validation.

- **Des techniques semi formelles** : il s'agit de techniques dont le niveau de résultat peut être considéré comme indépendant d'une expertise humaine mais sans pour autant revêtir un caractère exhaustif et indiscutable. D'un point de vue statique, il peut s'agir de vérifier la conformité du modèle à un standard existant. D'un point de vue dynamique, les techniques usuelles sont la simulation, l'émulation ou le test. Elles ont pour inconvénient la non exhaustivité des cas envisagés et donc l'impossibilité de garantir l'absence de fautes. Par exemple, il est en général impossible de tester un système avec tous les vecteurs d'entrées théoriquement valables sans risquer une explosion combinatoire de ces vecteurs. De même, on ne peut simuler tous les chemins d'exécution d'un modèle et seule une partie (critique) de ses comportements possibles est examinée. De fait, la pertinence et la qualité des résultats issus d'une simulation reposent essentiellement sur l'interprétation et donc sur la qualité du modèle de simulation [Balci et al. 2002 et sur les compétences et/ou l'expérience des utilisateurs. Il s'agit donc plutôt de techniques utilisables dans le cadre d'une validation ou de vérification en ce qui concerne par exemple le débogage (symbolique ou non) d'un modèle.

- **Des techniques formelles** : ce sont des techniques basées sur l'emploi de méthodes formelles<sup>10</sup> [Nasa 1998, Van Lamsweerde 2002, Jackson 2001, Chatel et al. 2004]. Elles reposent sur l'utilisation de langages et de concepts relevant du domaine des mathématiques. Par définition, un langage formel est en effet *un langage doté d'une sémantique mathématique adéquate basée sur des règles d'interprétation qui garantissent l'absence d'ambiguïté dans les descriptions produites et des règles de déduction qui permettent de raisonner sur les spécifications afin de découvrir de potentielles incomplétudes, inconsistances ou pour prouver des propriétés* [Petit 1999, Benzaken 1991].

En tant qu'approches mettant en œuvre de tels langages, notons essentiellement (mais en restant conscients de la non exhaustivité de cette liste arbitraire) la méthode Z [Spivey 1992], la méthode B [Abrial 1996], la méthode VDM [VDM 1996], ou des dérivées telle que Object-Z [Smith 2000, Hoenickel et al. 2005] s'inspirant à la fois de Z et du paradigme objet. A titre d'exemple, dans le domaine de l'ingénierie des systèmes de production, B et Z ont été employés [Pietrac 1999, Morel et al. 2001] pour établir des patrons de conception c'est à dire des modèles de référence pour la structuration et la modélisation de systèmes de production.

De telles méthodes offrent, outre la rigueur, la possibilité d'être mises en œuvre au moyen d'outils dont un panorama assez vaste est donné dans [Yahoda 2003]. Il s'agit d'outils de type démonstrateur de théorèmes (Theorem proving) ou vérificateur de modèles (model checking). Ils supportent souvent à la fois la description du modèle, la vérification formelle de la cohérence intrinsèque de ce modèle et sa validation à partir d'une instanciation sur certains cas particulier.

C'est, par exemple, le cas de l'atelier B [Abrial 1996], de Z-Eves [Saaltink 1999], de STEP [STEP 1996, Bjorner 1998] qui est basé pour sa part sur certaines logiques temporelles. [Lamboley 2001] utilise par exemple les outils d'intégration de l'atelier B pour la vérification de l'aptitude d'une architecture de commande associée à des processus physiques de transformation à satisfaire des exigences fonctionnelles. Il existe aussi des approches s'appuyant sur le raffinement de modèles [Archware 2004] ou sur la traduction ou la réécriture de modèles dans des langages cibles [Diallo 2000, Benghazi 2006].

Plus précisément, le Model Checking est destiné à la vérification de modèles comportementaux de systèmes modélisés sous forme de machines ou d'automates à états.

Etant donné une telle machine et une propriété, cette technique explore l'ensemble des états atteignables par cette machine afin de vérifier que la propriété désirée est bien satisfaite. En cas de violation de la propriété, la séquence de transitions d'état menant à la violation est générée en guise de contre-exemple montrant que le système est incorrect.

La propriété est considérée ici comme l'énoncé formalisé d'une attente au moyen d'un langage formel. Ce peut être une logique temporelle [Alur et al. 1991] linéaire, réifiée ou autre comme CTL Computational Tree Logic [Emerson 1990], ses extensions comme TCTL (Timed Computation Tree Logic) [Alur et al. 1993], ou encore LTL (Linear Temporal Logic). Ce peut être une logique d'ordre comme HOL (High Order Logic). Il peut enfin s'agir, mais on ne saurait alors être exhaustif, de langages spécifiques. Ils peuvent être basés sur des notions

---

<sup>10</sup> Le site web <http://vl.fmnet.info/donne> accès à nombre de ressources et de références aux méthodes formelles.

de processus communiquant tels que proposés par C.A.R. Hoare avec CSP (Communicating Sequential Process) [Hoare 2004], Estelle [Budkowski 1997, ISO 9074], Helena [Sami 2005], Promela (Process or Protocol Meta Language) qui est utilisé dans l'outil SPIN [Barnat et al. 2000, SPIN 2005], LOTOS [Mateescu 1998], ou des langages de processus sous une forme algébrique (mixant LOTOS et des Réseaux de Petri) dans CADP (Caesar Aldébaran Development Package) [Garavel et al. 2001, Garavel 1990]. Ce peut être enfin des langages s'inspirant des approches de type Mu calcul ou Pi calcul [Milner 1991, Archware 2004].

Plusieurs outils de Model Checking comme SMV [MacMillan 2000] ou PVS [Owre et al. 2001] sont entièrement automatiques et utilisés à l'échelon industriel par exemple dans le cadre d'applications critiques en sûreté [Faure et al. 2001, Volker et al. 2002, Roussel et al. 2004].

Cependant, les méthodes de model checking sont souvent limitées par l'explosion combinatoire du nombre d'états possibles dans une séquence. Plusieurs travaux de référence proposent donc des règles d'abstraction [Easterbrook 2002], de substitution, de projection partielle du modèle ou des hypothèses simplificatrices dont la traçabilité est permise.

A l'opposé, le theorem Proving repose sur la spécification d'un modèle d'un système à un certain niveau d'abstraction et sur la formulation d'hypothèses axiomatiques à partir d'une théorie de base. En termes de modélisation, une vue structurelle et une vue fonctionnelle du système peuvent être décrites plus aisément qu'avec une technique de modélisation liée au model checking qui se limite à des modèles à états. Cependant, le theorem proving est souvent dédié seulement à la vérification de programmes ou de spécifications.

La technique de vérification consiste à créer de manière progressive une preuve mathématique. En d'autres termes, il s'agit de décrire la propriété à vérifier sous la forme d'un théorème énoncé au moyen d'une logique comme pour le model checking et de montrer qu'il peut être directement déduit de la spécification du système et des axiomes en utilisant les règles de déduction propres à la logique utilisée.

Les outils suivants possèdent des fonctionnalités ou sont des theorem provers. Citons par exemple Z-Eves, COQ [COQ 2005], Otter [McCune 2003], ACL-2 [Kaufmann et al. 2006] qui supporte la logique HOL dans ses différentes versions de HOL80 à la version actuelle HOL 4 [HOL 2005] et l'environnement Isabelle [Isabelle 2005] bâti autour de HOL ou encore SPIN.

Cependant, un theorem prover est généralement considéré plutôt comme un « assistant de preuves » [Benzaken 1991] permettant la majeure partie du temps de guider l'utilisateur à construire une preuve plutôt qu'à réellement et totalement automatiser ce processus de preuve. De tels outils restent relativement difficiles à appréhender. La théorie sous jacente est toujours plus ou moins complexe et le problème d'indécidabilité<sup>11</sup> dans certain cas de preuve reste un obstacle à leur usage. Par exemple, l'absence d'asynchronisme dans des systèmes concurrents ne pourra être vérifiée que sous certaines hypothèses.

Pour conclure, ces techniques sont essentiellement utilisées dans des domaines concernant par exemple des systèmes à forte composante logicielle, des systèmes nécessitant une certaine sûreté de fonctionnement [Moncelet 1998], l'ingénierie des besoins [Rolland 2001] ou

---

<sup>11</sup> Il n'est pas possible, avec les hypothèses et les axiomes mis à disposition, de prouver une affirmation car le temps nécessaire pour atteindre ce résultat de preuve peut s'avérer infini.

l'ingénierie des systèmes. A titre d'exemple, l'INCOSE (International Council for System Engineering) [INCOSE 2004] définit la vérification plus largement et non nécessairement axée sur la manipulation du modèle lui-même. Elle propose ainsi l'usage des techniques suivantes :

- **Analyse** : si le système n'existe pas ou si un prototype est impossible à mettre à disposition alors seule l'analyse du ou des modèles de ce système est possible. Cette analyse peut être éventuellement basée sur la simulation, même partielle, de ces modèles comme le permet par exemple l'outil CORE [Core 2005]. Ainsi, seule cette technique concerne réellement l'utilisation du modèle du système.
- **Inspection** : recherche ' visuelle ' de preuves de conformité, etc.
- **Démonstration** : la preuve est le résultat simple, peu détaillé, voire même incomplet mais considéré comme suffisant, d'essais faits sur le système ou sur un prototype de ce système.
- **Test** : la preuve est alors un résultat très détaillé avec par exemple des mesures de performances.

La recherche développée jusqu'à aujourd'hui s'est donc focalisée sur ces approches de vérification et de validation et sur leur mise en œuvre dans ces différents domaines. Le travail a commencé en 1991 par l'étude de la simulation. Elle a évolué depuis 1996 vers les approches formelles pour le niveau d'exhaustivité et de confiance qu'elles peuvent conférer à un résultat d'analyse<sup>12</sup>.

***Le travail de recherche a porté sur le développement de techniques de vérification basées sur des approches formelles et de validation basées sur la simulation.***

***Le but global de la recherche a donc été de créer et d'enrichir une boîte à outils à la fois conceptuelle et opérationnelle de modélisation, de vérification (sur la base d'approches formelles) et de validation (sur la base d'outils de simulation). Cette boîte à outils se veut complémentaire et non substitutive des outils qui existent actuellement.***

Le projet de recherche proposé page 93 montre que les perspectives actuelles de ce travail portent à la fois sur la consolidation scientifique des résultats acquis, la mise en application de ces résultats à des fins de diffusion et l'exploration de nouvelles opportunités.

La suite du document présente la trajectoire d'évolution de cette recherche. Il met l'accent sur les problématiques et domaines pour lesquels j'ai développé cette boîte à outils de modélisation, de vérification et de validation :

- **La spécification et la validation par simulation** de systèmes de contrôle commande répartis en Génie Automatique.
- **La spécification formelle et l'analyse par preuve de propriétés** de modèles de comportement.

---

<sup>12</sup> Tout en restant conscient que le niveau de qualité du résultat reste étroitement lié aux conditions de mise en œuvre de ces approches (le niveau de formalisation du langage utilisé, la pertinence de la démarche, le temps disponible, le niveau de connaissance de l'acteur ou du groupe d'acteurs, etc.).

- **La formalisation et la vérification par preuve de propriétés** de modèles dans le domaine de la modélisation d'entreprise.

## **B - SPECIFICATION DE SYSTEMES DE CONTROLE COMMANDE REPARTIS**

Cette thématique a été abordée au cours de mon Doctorat entre Septembre 1991 et Octobre 1994. Elle s'est développée au Laboratoire d'Automatique et de Microélectronique de Montpellier (LAMM) devenu le Laboratoire d'Informatique, de Robotique et de Microélectronique de Montpellier (LIRMM) dans l'équipe Systèmes à Événements Discrets et Intelligence Artificielle du département de Robotique sous la direction de Mr le Professeur François Prunet.

### **1 - PROBLEMATIQUE**

La commande des Systèmes Automatisés de Production (S.A.P.) se décentralise et ses fonctions se répartissent en s'appuyant sur des technologies et des composants (réseaux temps réel, de terrain, de capteurs/actionneurs, capteurs et actionneurs intelligents, API plus légers, plus facilement répartissables et possédant des fonctionnalités nouvelles, etc.).

Les systèmes de contrôle commande doivent donc maintenant être décrits en tenant compte de ces technologies, de ces composants et surtout de l'accroissement important des flots de communications entre les différentes parties résultantes de cette répartition des fonctions de contrôle commande. Or, la commande d'un SAP est spécifiée généralement de manière synchrone et centralisée. Des principes de décomposition fonctionnelle (type SA et flots de données), de décomposition structurelle (découpage topo fonctionnel de la commande) et de spécification comportementale utilisant le Grafset peuvent alors être mis en œuvre comme proposé dans une étude antérieure [Giaccone 1991].

Cette spécification se traduit sous forme d'un ensemble de Grafsets communicants pouvant ensuite être exécutés sur une architecture basée par exemple sur des API. Cette exécution pose vraisemblablement peu de problèmes de mise au point si un seul API pilote effectivement l'ensemble de l'installation selon un mode de communication point à point avec les capteurs et les actionneurs. Par contre, l'hypothèse de synchronisme fort<sup>13</sup> utilisée durant la spécification est totalement faussée dès que l'on tentera de répartir cette même commande sur plusieurs API, sur plusieurs tâches possédant chacune leur propre fréquence de lancement, et d'utiliser des réseaux de communication aptes à répondre à des contraintes temporelles strictes, des capteurs et des actionneurs aptes à traiter en local certaines informations et à communiquer via ces mêmes réseaux. Le volume des communications alors nécessaires entre les différentes parties de la commande et les différents objets constitutifs de l'architecture, les contraintes temps réel devant être respectées au niveau du système

---

<sup>13</sup> Cette hypothèse de synchronisme repose sur l'idée qu'une seule ressource, supportant un système d'exploitation par exemple mono tâche, impose une seule et unique base de temps pour exécuter la totalité de la commande : tous les modules de commande évoluent ensemble, à la même vitesse et de façon massivement parallèle.

piloté, et les règles fondamentales comme les hypothèses évoluées d'évolution du GRAFCET<sup>14</sup> sont donc autant de limitations à une spécification purement synchrone.

L'ensemble devient difficile à spécifier et a fortiori à valider car peu de langages de modélisation permettent de prendre en compte de telles contraintes.

Le but du travail de recherche a donc consisté à développer l'approche de modélisation et de validation ACSY-R (Analyse de Commande de SYstèmes Répartis). Cette approche permet de modéliser la commande d'un Système Automatisé de Production puis de décrire et de valider par simulation une possible implantation physique, éventuellement répartie, de cette commande en vue de son exploitation.

## 2 - CONTRIBUTION A LA MODELISATION DE SCC REPARTIS

ACSY-R se présente donc comme une approche de modélisation composite mettant en œuvre divers langages de modélisation et une panoplie d'outils de simulation. La démarche consiste pour le modéleur de la commande à décrire deux modèles baptisés Modèle de Commande et Modèle d'Architecture :

- Le **Modèle de Commande** est le résultat de la spécification de la commande selon une approche synchrone. Cette spécification tend donc à se focaliser sur l'aspect fonctionnel de la commande sans se préoccuper dans un premier temps de l'implantation physique de celle-ci. L'approche de spécification est une approche fonctionnelle descendante, utilisant le concept de Diagramme de Flots. Cette approche permet de décomposer une fonction à assurer dans le système de production en un ensemble de sous fonctions plus simples. Chacune de ces sous fonctions peut être à son tour éventuellement décomposée. Lorsque la fonction est suffisamment simple, elle est alors décrite en GRAFCET si elle spécifie un comportement, ou en Langage Textuel (L.T.) si elle spécifie un traitement de données.

- Le **Modèle d'Architecture** permet de décrire et de prendre en compte l'ensemble des caractéristiques physiques et temporelles de l'architecture physique sur laquelle le Modèle de commande est appelé à être implanté. Cette architecture d'accueil, évidemment non unique et pouvant être définie au fur et à mesure, peut être composée d'éléments d'automatismes comme des automates programmables industriels, des capteurs, des actionneurs, des réseaux de communication, etc. Il a donc été proposé de s'inspirer de la norme BASE-PTA [Base-PTA 1992] pour développer un méta modèle des composants d'architecture de contrôle / commande possibles. Le modèle d'architecture utilise ce méta modèle pour décrire les caractéristiques des différents objets d'automatisme susceptibles d'être utilisés selon un formalisme objet et le comportement selon le formalisme des Réseaux de Petri Interprétés.

La distribution de la commande consiste ensuite à tenir compte des différentes contraintes imposées par les modèles de spécification employés (GRAFCET et L.T.), par le matériel choisi et l'application de commande elle-même. Pour cela, plusieurs algorithmes d'exécution

---

<sup>14</sup> Il s'agit, en particulier, de l'hypothèse forte délimitant un temps interne logique durant lequel l'évolution du Grafcet est possible jusqu'à obtention de stabilité et un temps externe (physique) sans commune mesure avec le temps interne. Cela induit donc l'apparition de nouveaux algorithmes de recherche de stabilité des modèles grafcets dans le temps interne avec la notion d'action fugace dont le résultat est visible dans ce temps interne et la notion de forçage entre des modèles grafcets donnant lieu à de nouvelles règles d'évolution.

du GRAFCET avec ou sans recherche de stabilité ont été testés et mis en œuvre selon qu'ils permettaient ou non de prendre en compte des ordres de forçages, des actions fugaces, ou d'autres contraintes imposées par la répartition du modèle de commande.

ACSY-R est ainsi plus une approche multi formalismes qu'un langage en tant que tel<sup>15</sup>.

### 3 - CONTRIBUTION A LA VALIDATION : SIMULATION

La vérification s'est ici limitée à l'analyse de la cohérence des E/S des graphes de commande avec la décomposition fonctionnelle de la commande. La validation consiste à simuler l'architecture opérationnelle résultante afin de vérifier le comportement et l'adéquation des fonctions de la commande selon leur répartition, le matériel employé et l'objectif fixé en termes de performance de la commande mais aussi de sa stabilité (insensibilité à certains événements) et de son intégrité (la perte d'un composant ou d'une fonctionnalité pouvant être simulée).

Pour cela, j'ai proposé, formalisé puis développé des moniteurs de simulation implémentant et tenant compte de la sémantique opérationnelle des Grafjets (moniteurs avec ou sans recherche de stabilité, avec recherche en profondeur ou en largeur d'abord) et des Réseaux de Petri Interprétés. Il s'agit alors d'une analyse quantitative permettant de s'assurer du dimensionnement de l'architecture et du respect de certaines contraintes temporelles auxquelles doit répondre le système.

### 4 - RESULTATS

Afin de démontrer l'intérêt et l'apport de cette démarche de modélisation, de vérification et de validation, j'ai participé puis ait été responsable du développement d'un outil logiciel de type Atelier Intégré pour le Génie Automatique (AIGA) baptisé GA pour Générateur d'Applications. Pour cela, une partition de l'environnement de base du Génie Automatique a été définie afin d'en extraire les objets pertinents, d'une part, à la représentation d'un tel atelier, d'autre part, des modèles, méthodes et outils existants dans le Génie Automatique. GA intègre ainsi la totalité des concepts, des algorithmes, des outils de modélisation, de vérification et de simulation développés au cours de la thèse et dans le cadre des DEA que j'ai encadrés.

Au cours de cette période, j'ai en effet défini les sujets et participé à l'encadrement des DEA suivants :

- D.Etienne et de N.Audry (DEA1 avec un taux d'encadrement de 30%) chargés de formaliser une structure de donnée centralisée baptisée « dictionnaire de conception » permettant de définir sans ambiguïté ni perte de sémantique chaque flot issu de la décomposition puis d'assurer la cohérence de l'ensemble des données et des informations que ces flots transportent.
- P.Finotto (DEA2 avec un taux d'encadrement de 50%) : afin de simplifier et d'optimiser le travail du modeleur, ce DEA a consisté à mettre en place des mécanismes de réutilisation

---

<sup>15</sup> UML est lui aussi appelé langage de modélisation alors qu'il s'agit plutôt d'un ensemble cohérent bien que non formel de langages de modélisation dédiés : diagramme de classes, diagramme de séquence, etc.

dans la spécification et la conception de Systèmes de Contrôle/Commande. Ces mécanismes permettent de mieux structurer et de réutiliser une partie commande existante.

- C.Vial (DEA3 avec un taux d'encadrement de 50%) qui a consisté à formaliser et développer une interface Homme/Machine générique nécessaire aux simulations et au suivi de l'exécution des modèles.

J'ai participé à l'encadrement d'un ingénieur CNAM (STA1) dans le cadre du développement d'un système de gestion des données techniques au sein de l'AIGA.

Enfin, la politique de publication et de diffusion sur cette thématique m'a permis, outre le manuscrit de thèse (MT), de publier un article dans la revue JESA (RN4) et un article dans la revue APII (RN5), trois articles dans des conférences internationales (CI35, CI36, CI37) et deux articles dans des conférences nationales (CN9, CN10).

Le Tableau 2 synthétise les résultats obtenus pour cette première thématique.

<b>Encadrement</b>	<b>3 DEA</b> (DEA1, DEA2, DEA3)
	<b>Stage CNAM</b> (STA1)
<b>Publication</b>	<b>Mémoire de thèse</b> (MT)
	<b>2 articles</b> dans une revue nationale : JESA (RN4), APII (RN5)
	<b>3 articles</b> dans des conférences internationales (CI35, CI36, CI37)
	<b>2 articles</b> dans des conférences nationales (CN9, CN10)
<b>Développement</b>	<b>Prototype fonctionnel d'un AIGA</b> (Atelier Intégré pour le Génie Automatique) baptisé Générateur d'Applications

Tableau 2 : Synthèse des résultats essentiels pour cette thématique

## 5 - EVOLUTION ET PERSPECTIVES

De nombreux travaux ont été menés depuis dans la communauté française mais aussi internationale autour de la vérification et de la validation de systèmes de contrôle commande et plus particulièrement du Grafcet. Ces travaux, dont une liste est donnée plus loin, mettent en œuvre des approches et des outils formels de preuve de propriétés. On voit donc toute la complémentarité entre ce type d'approche et une approche de simulation à la fois fonctionnelle puis opérationnelle telle que proposée dans mes travaux. C'est la raison pour laquelle je me suis ensuite tourné, durant la période post doctorale, vers l'aspect formel et ai proposé une mise en œuvre pour la preuve de propriétés de Grafcets.

De même, une convention de partenariat recherche / développement entre le LIRMM et le LGI2P, devenu entre-temps mon nouveau laboratoire d'accueil, a peu à peu émergé et s'est cristallisée entre autre autour de l'AIGA. Les développements effectués durant la période post doctorale y ont été en effet intégrés. Les travaux de développement et d'application actuels de la recherche s'inspirent encore largement de l'architecture, des objets et des outils disponibles dans cet AIGA. L'objectif est aujourd'hui d'intégrer les concepts et les outils proposés dans cet atelier afin de le mettre à disposition d'autres chercheurs.

## **C - SPECIFICATION FORMELLE ET PREUVE**

Ce travail a eu pour cadre l'équipe 'Vérification et Systèmes Complexes' dirigée par Mme le Professeur Janine Magnier au Laboratoire de Génie Informatique et d'Ingénierie de Production (LGI2P) de l'Ecole des Mines d'Alès. J'ai intégré cette équipe dès Octobre 1994 au titre de Post Doctorant avant d'obtenir le poste de Maître Assistant en Juillet 1996.

L'objectif de l'équipe était d'entreprendre une recherche de fond sur la modélisation de comportement au moyen de modèles à états [Hartmanis et al. 1966] et sur la vérification de propriétés. J'ai participé au travail de développement d'une approche formelle de modélisation comportementale et de l'approche associée de vérification par preuve de propriétés décrites en logique temporelle.

Comme dit plus haut, souhaitant démontrer l'intérêt de ces travaux et compléter les travaux sur la validation menés durant la thèse, j'ai appliqué les résultats obtenus dans le domaine de la spécification et de la preuve de propriétés des systèmes de contrôle commande décrits en Grafcet.

Cette thématique a été développée jusqu'à fin 1998. L'équipe a été dissoute en 2000 lors d'une restructuration du LGI2P.

### **1 - PROBLEMATIQUE**

La modélisation selon une approche discrète du comportement d'un système est souvent menée au moyen de langages de modélisation basés sur la notion d'automates à états qui ont toujours fait l'objet de propositions de formalisation. Si le niveau de formalisation est suffisant, la vérification par preuve de propriétés devient alors envisageable soit directement soit en se basant sur une réécriture si possible isomorphe du modèle dans un langage tiers. Cependant, ce niveau de formalisation impose souvent de ne disposer dans le modèle que d'entrées, de sorties ou de variables locales booléennes. Cela limite la capacité et la fidélité de description à la fois du comportement du système et des interactions de ce système avec son environnement.

L'objectif scientifique de ce travail a donc été double :

- Formaliser et outiller l'étape de modélisation proprement dite avec un langage de modélisation à état permettant de prendre en compte des entrées et sorties typées et de disposer de données internes elles aussi typées. Ce langage de modélisation comportementale a été baptisé Machine Séquentielle Interprétée (MSI) [Vandermeulen 1996].
- Prouver de manière formelle des propriétés à partir d'une spécification utilisant la MSI. Nous nous sommes alors orientés vers une technique de réécriture vers la logique temporelle linéaire.

### **2 - CONTRIBUTION A LA MODELISATION : MSI ET MSI SYNCHRONE**

Le travail a d'abord consisté à formaliser la MSI. Les modèles établis à partir de ce langage de modélisation offrent deux caractéristiques intéressantes :

- A l'opposé des modèles classiques de machine séquentielle ou d'automate d'état manipulant des variables exclusivement booléennes, la MSI permet de manipuler des entrées/sorties typées (Booléen, Entier, Réel, de type caractère ou de type construit) et des expressions complexes à partir de données internes elles aussi typées. La MSI offre ainsi une séparation forte entre spécification du comportement et spécification des données qui facilite la spécification du comportement par un nombre réduit d'états à décrire.

- Ce langage possède ensuite un méta modèle mathématique permettant de proposer des mécanismes de vérification formels dans la suite du travail de recherche (de fin 1996 à mi 1997 essentiellement).

La MSI étudiée au cours de cette période est dotée de deux parties communicantes appelées Partie Commande et Partie Donnée synthétisées dans la Figure 2.

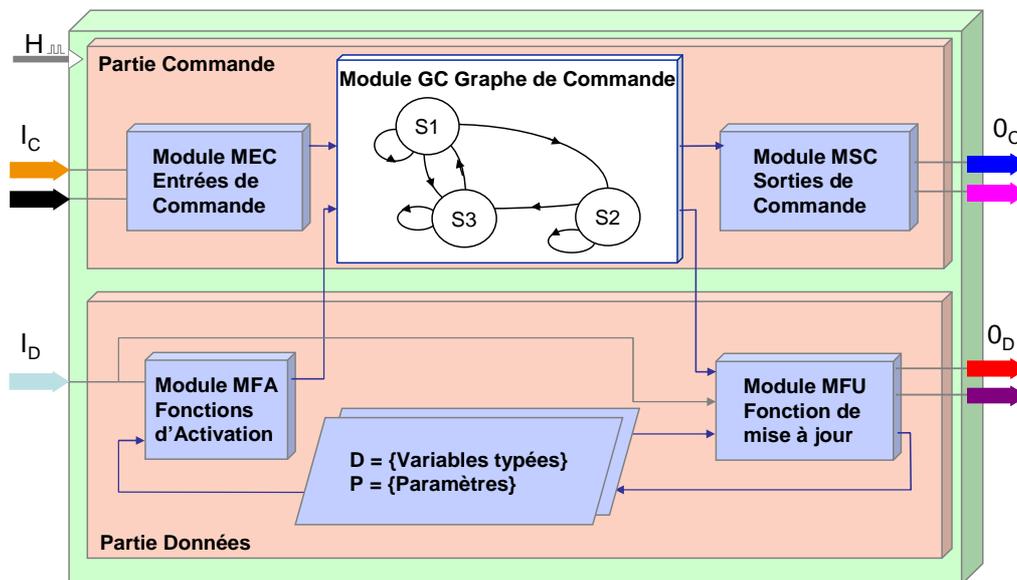


Figure 9 : Synopsis de la Machine Séquentielle Interprétée

Comme le montre cette figure, la Partie Commande (PC) est composée de trois modules communicants au moyen de variables propositionnelles.

Elle est définie par le quintuplé :

$$PC = \langle I_C, GC, MEC, MSC, O_C \rangle$$

Où :

- $I_C = \{i_{C1}, \dots, i_{Cn}\}$  est l'ensemble des entrées (typées) de commande.
- $O_C = \{o_{C1}, \dots, o_{Cm}\}$  est l'ensemble des sorties (typées) de commande.
- GC est un graphe d'état:

$$G = \langle S, F, U, E, Z, \delta, \lambda, \beta \rangle$$

Dont les composants sont :

- S est l'ensemble des états
- $F = \{f_1, \dots, f_h\}$  est l'ensemble des variables propositionnelles d'activation

- $\mathbf{U} = \{\mathbf{u}_1, \dots, \mathbf{u}_g\}$  est l'ensemble des variables propositionnelles de mise à jour
- $\mathbf{E} = \{\mathbf{e}_1, \dots, \mathbf{e}_x\}$  est l'ensemble des variables propositionnelles d'entrée de commande
- $\mathbf{Z} = \{\mathbf{z}_1, \dots, \mathbf{z}_w\}$  est l'ensemble des variables propositionnelles de sortie de commande
- $\delta : \mathbf{S} \times \mathbf{E} \times \mathbf{F} \rightarrow \mathbf{S}$  est la fonction transition
- $\lambda : \mathbf{S} \times \mathbf{E} \times \mathbf{F} \rightarrow \mathbf{Z}$  est la fonction de sortie
- $\beta : \mathbf{S} \times \mathbf{E} \times \mathbf{F} \rightarrow \mathbf{U}$  est la fonction de mise à jour

•  $MFC = \{\underline{e}_1, \dots, \underline{e}_x\}$  est l'ensemble des fonctions d'entrée de commande  $\underline{e}_k$ . Il s'agit de fonctions booléennes évaluées à partir des entrées de commande IC :

$$\forall k \in [1,x], \underline{e}_k : I_C \rightarrow \{0, 1\}$$

Chaque variable propositionnelle  $\mathbf{e}_k$  est associée à une unique fonction  $\underline{e}_k$ :

$$\forall k \in [1,x], \underline{e}_k = 1 \Leftrightarrow \mathbf{e}_k = \text{Vraie}$$

•  $MFC = \{\underline{z}_1, \dots, \underline{z}_w\}$  est l'ensemble des fonctions de sorties de commande. Ce sont des fonctions permettant de mettre à jour les sorties de commande OC :

$$\forall k \in [1,w], \underline{z}_k : O_C \rightarrow O_C$$

Chaque variable propositionnelle  $\mathbf{z}_k$  est associée à une unique fonction  $\underline{z}_k$ :

$$\forall k \in [1,w], \mathbf{z}_k = \text{Vraie} \Leftrightarrow \underline{z}_k \text{ est exécutée}$$

La Partie Donnée (PD) est composée de trois modules permettant essentiellement de gérer l'état de données. Elle est définie par le 7-uplet :

$$PD = \langle I_D, \mathbf{F}, \mathbf{U}, F, U, P, D, O_D \rangle$$

Où :

- $I_D = \{i_{D1}, \dots, i_{Dp}\}$  est l'ensemble des entrées (typées) de données.
- $O_D = \{o_{D1}, \dots, o_{Dq}\}$  est l'ensemble des sorties (typées) de données.
- $D = \{v_1, \dots, v_s\}$  est l'ensemble des variables internes (typées) du modèle
- $P = \{p_1, \dots, p_g\}$  est l'ensemble des paramètres internes (constantes typées) du modèle
- $F = \{\underline{f}_1, \dots, \underline{f}_h\}$  est l'ensemble des fonctions d'activation  $\underline{f}_k$ . Il s'agit de fonctions booléennes évaluées en tenant compte des entrées de données et de l'état interne des variables et des paramètres :

$$\forall k \in [1,h], \underline{f}_k : D \times I_D \rightarrow \{0, 1\}$$

Chaque fonction  $\underline{f}_k$  est associée à une variable propositionnelle  $\mathbf{f}_k$ :

$$\forall k \in [1,h], \underline{f}_k = 1 \Leftrightarrow \mathbf{f}_k = \text{Vraie}$$

•  $U = \{\underline{u}_1, \dots, \underline{u}_g\}$  est l'ensemble des fonctions de mise à jour  $\underline{u}_k$  qui calculent les nouvelles valeurs des variables internes et des sorties de donnée :

$$\forall k \in [1,g], \underline{u}_k : D \times I_D \rightarrow D \times O_D$$

Chaque variable propositionnelle  $u_k$  est associée à une unique fonction  $\underline{u}_k$ :

$$\forall k \in [1,g], u_k = \text{Vraie} \Leftrightarrow \underline{u}_k \text{ est évaluée}$$

Un langage formel de description de l'ensemble des fonctions d'entrées et de sortie de commande, d'activation et de mise à jour des données permet de manipuler les données typées.

Le fonctionnement d'un tel modèle est schématisé comme suit :

- Le module des entrées de commande (MEC) calcule les conditions sur les entrées de commande ( $I_C$ ) et ré initialise l'ensemble des variables propositionnelles  $e_j$ .
- Le module des fonctions d'activation (MFA) calcule les conditions d'évolution du GC à partir des entrées de données ( $I_D$ ), des variables et des paramètres internes au modèle (éléments respectifs des ensembles D et P). Ce module réinitialise à son tour les variables proposition  $f_j$ .
- Le module Graphe de Commande (GC) est composé d'une alternance d'états  $S_i$  et de transitions étiquetées (cf. Figure 10). Le graphe d'état évolue par franchissement d'une unique transition à chaque top d'horloge. Ce franchissement est conditionné par les variables propositionnelles  $e_j$  et  $f_j$  et par l'état courant du GC. Chaque franchissement réinitialise les variables propositionnelles  $z_j$  et  $u_j$

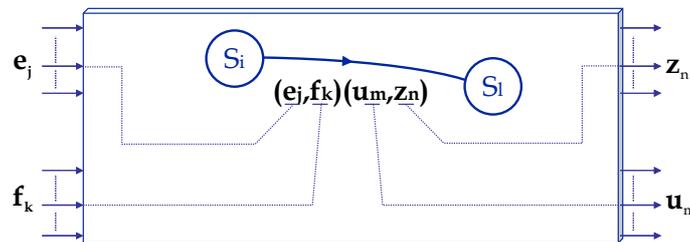


Figure 10 : Une transition du module GC

- Le module de sortie de commande (MSC) met à jour la valeur des sorties de commande ( $O_C$ ) en tenant compte de la valeur des variables propositionnelles  $z_j$  venant du module GC.
- Le module de fonction de mise à jour (MFU) met à jour les valeurs des variables internes et des sorties de données ( $O_D$ ) en tenant compte de la valeur des variables propositionnelles  $u_j$  venant du module GC.

La dynamique (i.e. la sémantique opérationnelle du modèle de MSI) d'une transition  $T = [(S_i, e_j, f_k), (S_1, u_m, z_n)]$  se décrit alors (pour cette version de la MSI) dans le Tableau 3.

### $S_i$

la variable propositionnelle $S_i$ est vraie $(S_i = \text{vraie si } S_i \in S \text{ est l'état courant dans lequel se trouve le GC,}$ par défaut l'état initial à l'instant $t=0$ )
la variable propositionnelle $e_j$ est vraie (les entrées de commande vérifient la fonction d'entrée de commande $\underline{e}_j$ ).
la variable propositionnelle $f_k$ est vraie

(les entrées de données et l'état interne des données et des paramètres vérifient la fonction d'activation $f_k$ ).
<b>Alors, la transition T est franchie et cela entraîne</b>
la mise à vrai de la variable propositionnelle $z_n$ permettant l'application de la fonction de sortie de commande $z_n$ : les sortie de commande sont mises à jour.
la mise à vrai de la variable propositionnelle $u_m$ permettant l'application de la fonction de mise à jour $u_k$ : les sortie de données et l'état interne des données est mis à jour.
l'état courant de la Partie Commande devient l'état $S_i$ (la variable propositionnelle $S_i$ devient vraie).

Tableau 3 : Sémantique opérationnelle simplifiée d'une transition

Cependant, cette MSI réagit à des tops d'une horloge centralisée qui permet l'échantillonnage des entrées. Pour aller plus loin dans la description du comportement de systèmes à événements discrets, j'ai alors proposé et développé dans le cadre du DEA de S.Planchon (DEA4 avec un taux d'encadrement de 50%) une deuxième version de ce langage de modélisation baptisé MSI Synchrone, ou encore MSI réactif à temps nul.

Nous nous sommes inspirés de la définition de l'approche synchrone telle que proposée pour les langages Lustre, Esterel [Berry et al. 1987] ou Signal. La MSI Synchrone réagit à l'occurrence d'événements. Ces événements sont portés par des signaux qui possèdent leur propre comportement et définissent donc une échelle temporelle propre qui n'est plus unique pour la MSI. L'hypothèse de temps nul consiste ensuite à dire que le modèle évolue sous l'action d'événements plus vite que son environnement et atteint un état stable avant l'occurrence possible d'un nouvel événement. Il est ainsi pourvu d'une échelle de temps interne comme proposée pour le GRAFCET.

La notion et la formalisation d'un signal et d'un événement comme la formalisation de la sémantique opérationnelle de la MSI Synchrone (basée sur l'emploi du formalisme des Types Abstrait de Données ou TAD) ne sont pas décrits en détail ici mais sont disponibles dans [Planchon 97]. La suite donne seulement un aperçu de la structure et de la formalisation de base de cette évolution du modèle de MSI vers le modèle de MSI synchrone.

En effet, un modèle réactif, décrit par la Figure 11, comprend :

- des interfaces d'entrée/sortie,
- une partie traduisant la réactivité,
- une partie traitant les données.

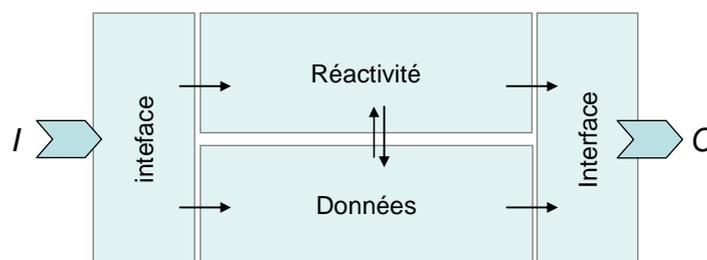


Figure 11 : Modèle réactif

La vue interne d'une MSI est ainsi décomposée en quatre modules disjoints comme le montre la Figure 12, assurant respectivement le rôle d'interface, de base de données ou de noyau de traitement réactif et synchrone. Une MSI est donc décrite par le 6-uplet :

$MSI = \langle I, O, IE, PC, PD, IS \rangle$  où :

- L'interpréteur d'entrée (IE) traite l'occurrence des événements sur des entrées de commande et gère l'échange de données avec d'autres MSI ou l'environnement via les entrées de données.
- L'interpréteur de sortie (IS) traite les opérations sur les variables internes et sur les sorties du modèle qu'elles soient de type événements auquel cas il s'agit des sorties de commande ou de type données auquel cas il s'agit de sorties de données permettant de communiquer avec d'autres MSI ou l'environnement.
- La Partie Commande (PC) est décrite par un graphe d'état.
- La Partie Donnée (PD) est la mémoire des données.

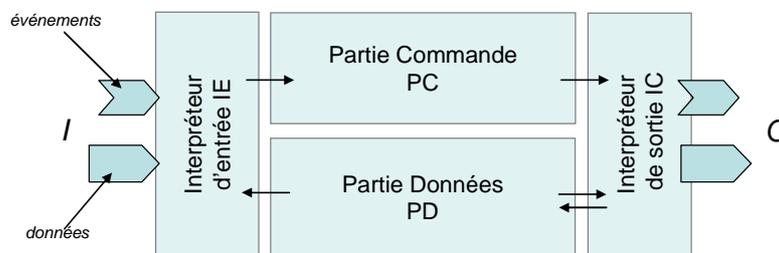


Figure 12 : Les 4 modules d'une MSI Synchrone

Ce modèle de MSI a enfin été enrichi de règles de décomposition et d'interconnexion permettant de modéliser un comportement selon une approche descendante et modulaire.

### 3 - CONTRIBUTION A LA VERIFICATION : LOGIQUE TEMPORELLE LINEAIRE

J'ai contribué aux premiers travaux autour de la réécriture d'un modèle MSI en Logique Temporelle Linéaire [Manna et al.1982, Manna et al. 1992, Audureau et al. 1990]. Ils ont consisté à suivre la voie préconisée par les travaux de [Magner 1990].

Dans un premier temps, chaque transition du GC est traduite dans une Formule Valide Élémentaire (FVE) se définissant comme suit :

$$FVE ::= \square ( S_i \wedge e_j \wedge f_k \supset oS_i \wedge u_m \wedge z_n )$$

Le comportement du graphe d'état d'une MSI se voit ainsi décrit sous forme d'une suite de **FVEs** comme le montre l'exemple donné Figure 13.

Il devient alors possible de décrire dans une équation logico temporelle quelles sont les conditions d'obtention d'un événement temporel  $E_t$  à un instant  $t$  donné, que cet événement temporel soit un état futur ( $oS_i$ ), l'activation d'une fonction de mise à jour ( $u_i$ ) ou d'une fonction de sortie de commande ( $z_j$ ).

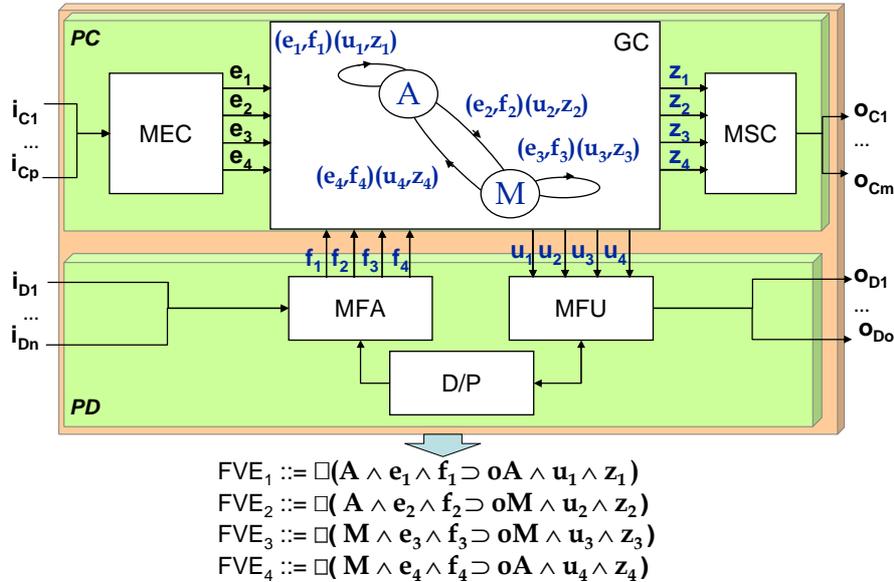


Figure 13 : Traduction du graphe de commande vers des FVEs : un exemple...

On obtient alors des Formules Valides Unifiées (**FVU**) définies comme suit :

$$FVU(E_i) ::= \bigvee_{(p, q, r) / \square(S_p \wedge e_q \wedge f_r \supset E_i)} (S_p \wedge e_q \wedge f_r)$$

L'exemple donné Figure 13 permet d'écrire par exemple les deux **FVUs** données dans la Figure 14 :

- la  $FVU_1$  décrit les conditions pour que l'état A soit actif à l'instant suivant i.e. si et seulement si [(le GC est déjà dans l'état A et si  $e_1$  et  $f_1$  sont des variables propositionnelles vraies) ou (si le GC est dans l'état M et si  $e_3$  et  $f_3$  sont des variables propositionnelles vraies)]
- La  $FVU_2$  décrit les conditions dans laquelle l'état actif du GC sera l'état A dans deux instants. On peut ainsi généraliser à n instants d'évolution (soit n tops d'une horloge discrète quelconque rythmant l'évolution du modèle) et décrire ainsi des conditions sur les chemins d'exécution.

$$\begin{aligned} FVU_1 &::= FVU(oA) = (A \wedge e_1 \wedge f_1) \vee (M \wedge e_4 \wedge f_4) \\ FVU_2 &::= FVU(o^2A) = [A \wedge (e_1 \wedge f_1) \wedge o(e_1 \wedge f_1)] \vee \\ &\quad [A \wedge (e_4 \wedge f_4) \wedge o(e_1 \wedge f_1)] \vee \\ &\quad [M \wedge (e_3 \wedge f_3) \wedge o(e_4 \wedge f_4)] \vee \\ &\quad [M \wedge (e_4 \wedge f_4) \wedge o(e_1 \wedge f_1)] \end{aligned}$$

Figure 14 : Obtention de FVUs à partir des FVEs

L'idée de ce travail est d'analyser la dépendance qu'il peut exister entre une **FVU** et l'état d'une variable propositionnelle donnée c'est-à-dire, après interprétation, d'une fonction d'activation, d'une fonction d'entrée de donnée ou d'un état précédent. Cette dépendance permet en effet de s'assurer de certaines propriétés de base :

Une nouvelle formule dite Formule Valide Dérivée (**FVD**) a alors été formalisée en utilisant une extension de la Dérivée Booléenne proposée par [Kohavi 1978] et reprise par [Magner

1990]. La Dérivée Booléenne (DB) d'une fonction booléenne  $f$  par rapport à l'une de ses variables  $v_i$  s'exprime comme suit :

$$\frac{\partial f}{\partial v_i} = f(v_1, \dots, v_{i-1}, 0, v_{i+1}, \dots, v_n) \oplus f(v_1, \dots, v_{i-1}, 1, v_{i+1}, \dots, v_n)$$

La DB possède des propriétés formelles intéressantes permettant de prouver la dépendance ou l'indépendance entre une variable et la fonction comme montré dans la Figure 15.

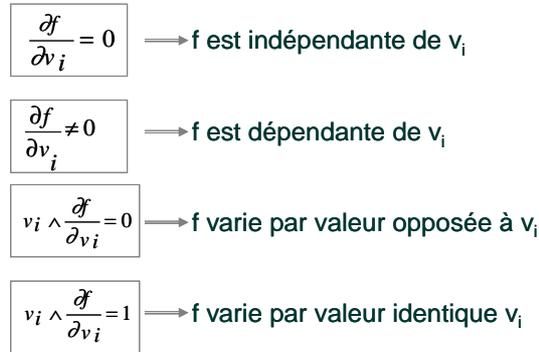


Figure 15 : Utilisation de la dérivée booléenne

L'extension proposée durant ces travaux est appelée Dérivée Booléenne Temporelle (DBT) qui se définit comme suit :

$$\frac{\partial FVU(E_t)}{\partial q} ::= C_t(q) \oplus C_t(\neg q)$$

$$\frac{\partial FVU(E_t)}{\partial q} ::= (C_t(q) \wedge \neg C_t(\neg q)) + (\neg C_t(q) \wedge C_t(\neg q))$$

Avec :

- $C_t(q) ::= (FVU(E_t), q)$  décrit les conditions pour que  $(q=\text{vraie}) \supset (E_t \text{ vrai})$
- $C_t(\neg q) ::= (FVU(E_t), \neg q)$  décrit les conditions pour que  $(q=\text{fausse}) \supset (E_t \text{ vrai})$
- $\neg C_t(q) ::= \neg(FVU(E_t), q)$  décrit les conditions pour que  $(q=\text{vraie}) \supset (E_t \text{ faux})$
- $\neg C_t(\neg q) ::= \neg(FVU(E_t), \neg q)$  décrit les conditions pour que  $(q=\text{fausse}) \supset (E_t \text{ faux})$

Une **FVD** est alors définie comme l'application d'une DBT à une **FVU** suit :

$$FVD(E_t, q) ::= \frac{\partial FVU(E_t)}{\partial q}$$

L'utilisation des formules valides présentées ci-dessus permet effectivement de prouver un certain nombre de propriétés mais diverses hypothèses doivent cependant être respectées :

- Une MSI doit être **non ambiguë** et **complètement spécifiée**. Cela signifie que, quel que soit l'état courant de la Partie Commande et à tout instant, la configuration des entrées de commande, des entrées de données et des variables internes de Partie Données, **une et une seule** transition peut et doit être franchie. Autrement dit, une et une seule combinaison de variables propositionnelles  $e_i$  et  $f_k$  est vraie et il existe toujours une transition franchissable et une seule à laquelle correspond cette combinaison.
- **Déterminisme en état** : A tout instant, une et une seule variable propositionnelle d'état  $S_i$  est vraie. Cette propriété se traduit par les deux tautologies suivantes :

$$\bigvee_{S_i \in S} S_i \quad \text{et} \quad S_i \supset \bigwedge_{i \neq j} \neg S_j$$

- **Etat initial** : il existe un état  $S_i$  dit état initial actif à l'instant 0.
- **Hypothèse temporelle** : un modèle évolue dans un temps interne sans commune mesure avec un quelconque temps externe : l'évolution se fait donc selon une hypothèse de temps nul.

Les propriétés visées alors sont les suivantes:

- **Propriétés structurelles** : elles caractérisent la structure du GC et sont alors par définition toujours vérifiées puisque indépendantes du temps ou de l'état des données. Il s'agit de propriétés permettant de détecter des états puits structurels, des états sources structurels et des états équivalents<sup>16</sup> structurels.

- **Propriétés fonctionnelles** : définies ici comme des propriétés vérifiables à certains instants (on parle aussi de propriétés temporelles) ou pour certains états de données internes. Il peut alors s'agir de propriétés permettant de détecter des états puits ou sources fonctionnels, des états équivalents fonctionnels

- **Propriétés comportementales** : il s'agit alors de formaliser dans une propriété des séquences :

- de **différenciation** : c'est une séquence d'entrée notée  $(e_i \wedge f_j)_n$  qui, appliquée à deux états différents  $S_m$  et  $S_p$ , donne deux séquences de sorties  $(u_k \wedge z_l)_n$  différentes.
- de **synchronisation** : c'est une séquence d'entrée notée  $(e_i \wedge f_j)_n$  qui met le modèle dans un état  $S_k$  pour tout état initial.

Le travail a alors consisté à formaliser la notion de FVD et de FVU pour les besoins de preuve de ces propriétés au moyen de la logique temporelle. Enfin, la définition d'une sémantique opérationnelle formelle pour la MSI Synchrone permet d'exécuter un modèle MSI et donc de procéder à sa simulation ou à son émulation.

#### 4 - APPLICATION : VERIFICATION DE PROPRIETES DE GRAFCET DE COMMANDE

Partant de l'état de l'art établi par [Roussel 1994] en ce qui concerne les méthodes et outils développés en vue de la vérification d'un Grafcet tel que décrit dans la norme [IEC 848], j'ai développé et mis en œuvre une démarche de vérification indirecte.

Une telle approche passe par la réécriture du Grafcet à vérifier vers un modèle intermédiaire possédant des outils de vérification associés. On peut ainsi citer les travaux sur les Langages Synchrones [Le Parc et al. 1993, Le Parc 1994] et les langages Asynchrones comme Electre [Roux 1994] qui ne respectent pas toutes les règles d'évolution du GRAFCET, les Réseaux de Petri [David et al. 1989, Moalla 1981, El Rhalibi et al. 1995, Aygalinc et al. 1993] qui nécessitent des restrictions importantes sur les Grafcets à traduire et les règles d'évolution, ou encore les Systèmes de Transitions [Le Parc 1994] [L'Her et al. 1995].

---

<sup>16</sup> Quel que soit l'état source du GC, si les mêmes conditions sur  $e_i$  et  $f_j$  et les mêmes effets sur  $z_m$  et un permettent d'activer deux états différents dont les variables propositionnelles sont notées  $S_k$  et  $S_l$  et si les mêmes conditions  $e'_i$  et  $f'_j$  et les mêmes effets sur  $z'_m$  et  $u'_n$  permettent d'activer le même état suivant alors  $S_k$  et  $S_l$  sont équivalents

L'idée du travail débuté durant cette période et qui s'est ensuite prolongé jusqu'à fin 2006, est d'utiliser le langage de modélisation MSI comme langage cible de cette réécriture car conceptuellement très proche du GRAFCET.

La réécriture d'un modèle établi au moyen d'un langage vers un autre modèle pose toujours la question de l'origine vraie des propriétés établies sur le modèle final. Est-ce le modèle source (le Grafcet à étudier) qui possède réellement ces propriétés ? Est-ce au contraire le modèle cible (ici, un ensemble de modèles de MSI interconnectés) qui, s'il permet effectivement de rendre compte de la structure et du comportement du modèle source impose ou masque par lui-même certaines propriétés ? Est-ce aussi le traducteur qui introduit un biais ? Pour tenter de résoudre ces problèmes, je me suis attaché à définir des règles formelles de réécriture permettant de traduire tous les concepts inhérents du GRAFCET, à savoir :

- Les règles d'évolution.
- Les postulats temporels comme la non simultanée d'événements et la présence de deux échelles de temps : temps interne et temps externe [Adepa 1992]. Le temps interne est le temps nécessaire au calcul de l'état futur et le temps externe est le temps dans lequel les entrées sont lues et les sorties écrites.
- Le parallélisme, qu'il soit structurel ou interprété.
- Un nombre d'étapes initiales quelconque.
- La présence éventuelle d'ordres de forçage entre deux Grafcets qui introduit un asynchronisme, la propagation prioritaire de tels ordres dans le temps interne et la hiérarchie entre ces Grafcets qui en découle.

Cependant, les temporisations n'ont pu être représentées ce qui aurait rendu nécessaire l'utilisation d'autres outils tels que, par exemple, Kronos testé à l'époque et basé sur des automates d'état temporisés [Yovine 2002].

La démarche proposée pour vérifier un ou plusieurs, Grafcet(s) se décompose en trois phases :

- **Description de l'algorithme d'évolution du GRAFCET** qui se décompose en un cycle de lecture des entrées, de calcul des états futurs selon 5 règles d'évolution plus une règle de forçage et de l'écriture des sorties. Une première MSI, baptisée MSI-Moniteur a donc été formalisée pour implémenter cet algorithme et donc prendre en compte la sémantique opérationnelle du Grafcet.
- **Description structurelle et comportementale du graphe** : Le travail a consisté alors à formaliser les éléments structurels d'un Grafcet : étapes, transitions et leurs interconnexions puis leur comportement propre. Chaque étape  $E_n$  du Grafcet source est ainsi traduite dans une MSI baptisée MSI- $E_n$  possédant des spécificités propres. De même, chaque transition  $T_m$  est traduite dans une MSI- $T_m$ . La structure du Grafcet source est ainsi décrite au moyen de l'interconnexion d'une MSI-Moniteur, des MSI- $E_n$  et des MSI- $T_m$ .
- **Recherche de propriétés** : les principes de vérification basés sur la logique temporelle linéaire de la MSI permettent enfin de rechercher des propriétés du type :

- quelles sont les règles d'activation d'une ou plusieurs étapes ?
- quelles sont les conditions d'exécution d'une action ?
- recherche de situations instables<sup>17</sup>,
- calcul des états atteignables<sup>18</sup>,
- recherche des transitions non franchissables,
- recherche d'incohérences dans la transmission des ordres de forçage.

## 5 - RESULTATS

La formalisation et l'analyse par preuve de MSI ont donné lieu, outre l'encadrement du DEA4, à deux articles dans des conférences internationales (CI33, CI34).

Le mode de réécriture et de vérification de Grafsets de commande que j'ai proposé a fait l'objet de deux publications dans des conférences internationales (CI31, CI32) et d'un article dans une conférence nationale (CN8). Ce travail a fait en outre l'objet de deux présentations de travaux dans le cadre du Groupe Grafset de l'AFCEC (PT11 et PT12) et d'un travail en collaboration avec la Société développant le logiciel Automgen pour spécification de PC en Grafset.

Enfin, de nouveaux concepts et mécanismes de preuve temporelle du modèle de MSI ont été proposés et formalisés jusqu'en 1998 au sein de l'équipe de recherche. Ces derniers développements ont fait l'objet de 7 articles dans des conférences internationales en 1997 et 1998 (CI19, CI23, CI24, CI25, CI26, CI27, CI30).

Le Tableau 4 synthétise les résultats de publication et de développement liés à ces activités.

<b>Encadrement</b>	1 DEA (DEA4)
<b>Publication</b>	11 articles dans des conférences internationales (CI33, CI34, CI31, CI32, CI19, CI23, CI24, CI25, CI26, CI27, CI30)
	1 article dans une conférence nationale (CN8)
	2 présentations de travaux dans la communauté (PT11, PT12)
<b>Développement</b>	Modeleur et vérificateur syntaxique de MSI

Tableau 4 : Synthèse des résultats essentiels dans cette thématique

## 6 - EVOLUTION ET PERSPECTIVES

J'ai pu apprécier durant ce travail l'enjeu et l'usage des approches formelles pour guider ou aider l'ingénierie de systèmes complexes plus sûrs, plus performants, plus robustes et plus en adéquation avec les attentes des utilisateurs.

La rigueur, l'exhaustivité et les possibilités de vérification et de validation qui s'offrent en sont bien évidemment les atouts majeurs. Cependant, augmenter le niveau de formalisation

<sup>17</sup> La situation courante d'un Grafset G est l'ensemble des étapes de G qui sont actives à l'instant courant. Une situation instable est une situation visible seulement dans le temps interne.

<sup>18</sup> Un état atteignable est un état stable c'est-à-dire une situation visible du graphe dans le temps externe

impacte nécessairement, et à la fois, les principes mêmes, l'usage et les savoirs de modélisation qui doivent s'adapter et s'améliorer. Tout n'est pas formalisable mais un juste milieu existe nécessairement. C'est là un verrou à la fois conceptuel et technique qui doit être levé pour permettre de tendre vers un usage plus serein et plus efficace des approches formelles.

Le but des travaux qui ont commencé à partir de mi-1997 a été justement de reprendre et de repenser les travaux de formalisation, de vérification par preuve formelle et de validation par simulation pour répondre alors à la problématique de vérification et de validation dans et pour le domaine de la modélisation d'entreprise. En effet, la modélisation d'entreprise restait et reste encore relativement peu outillée en termes d'outil(s) ou même de concepts de V&V, voire de VVQC, et qu'il n'existe pas encore une vraie prise de conscience de la nécessité de la vérification et de la validation. La modélisation d'entreprise a donc été dans la suite considérée à la fois comme un domaine de recherche nécessitant le développement de concepts et d'outils de modélisation pouvant être formellement vérifiés et/ou validés, et comme un domaine applicatif.

## **D - VERS LA MODELISATION D'ENTREPRISE**

Suite à une réorganisation de la recherche au LGI2P, je suis passé au cours de cette période de l'équipe 'Vérification et Systèmes Complexes' au projet de recherche 'Organisations Virtuelles Interopérables et Dynamiques en Entreprise' (OVIDE). Ce projet est le plus important des 3 projets de l'axe Intelligence Collective et Travail Collaboratif du LGI2P.

### **1 - PROBLEMATIQUE GLOBALE**

La modélisation d'entreprise [Vernadat 1996, Vallespir 2003, GRP 1999] a pour objectif la construction de modèles d'une ou plusieurs parties déterminées d'une entreprise pour en expliquer la structure et le fonctionnement ou pour en analyser le comportement. Un modèle d'entreprise a donc pour objectif de *formaliser tout ou partie de l'entreprise dans le but de comprendre ou d'expliquer une situation existante ou pour réaliser puis valider un projet conçu* [Braesch et al. 1995]. Un modèle d'entreprise est ainsi le moyen permettant de fonder une idée, un jugement, de communiquer avec des acteurs de l'entreprise, d'argumenter une décision, de valider des objectifs de tout ou partie du système entreprise et de piloter l'évolution de ce système.

Pour ce faire, de nombreux langages, méthodes, outils, architectures et cadres de référence ont été développés depuis les années 1970 pour couvrir tour à tour plusieurs besoins ou adopter différents points de vue de manière opérationnelle en industrie comme d'un point de vue plus conceptuel. Sans être exhaustif, citons essentiellement les travaux suivants.

- L'origine : La modélisation fonctionnelle (Idef-0 [Menzel 1998], SADT [Douglas 1977]) et la modélisation de systèmes d'information (modèles entité-relations, les approches objet [Mertins et al. 1995] avec OMT qui a ensuite évolué vers UML [OMG 2004, Booch et al. 1999]) et des flux de données

- L'approche ontologique [Fox et al. 1997, Fox et al. 1998] qui a fait émerger PSL (Process Specification Language) [ISO 18629], TOVE [Fox 1992]
- Un effort de développement a vu l'apparition de méthodes telles que CIMOSA [AMICE 1994] qui visait le problème d'intégration et de modélisation en entreprises (Enterprise Modeling and Integration), ARIS [Sheer 1998], de nombreux langages (IDEF3, IEM, DEM, ...)
- Un certain nombre d'approches se focalisant sur les processus opérationnels [Mougin 2002] puis le Business Process Modelling (BPM) [Boullier et al. 2002] donnant des langages de modélisation comme le BPML [Arkin 2002] et plus généralement des notations telles que le BPMN [BPMN 2003].
- Des architectures ou des cadres de référence ont permis alors de formaliser certains aspects incontournables de l'entreprise, de son système d'information ou plus simplement de l'utilisation méthodologique de certaines approches. Pour certains, ils ont donné lieu à normalisation et ont été associés quelquefois à des modèles de maturité comme celui proposé par [Sekkerman 2003 a]. Citons par exemple PERA (Purdue Enterprise Reference Architecture) [PERA 2001], GERAM (Generalized Enterprise Reference Architecture and Methodology) [Bernus et al. 1996], Zachman [Zachman 1987], différentes évolutions de Zachman comme celles proposées dans [O'Rourke et al. 2003, McGovern et al. 2003], le C4SR Framework définit par [C4SR 1997] et les constructs proposés et formalisés entre autre dans [ISO 19440].
- Au niveau national, notons l'apparition des approches de modélisation d'entreprise GRAI [Roboam 1993, Doumeingts 1984] qui a évolué ensuite vers GRAI-GIM (GRAI Integrated Methodology) [Doumeingts et al. 1998, Zanettin et al. 1992], Olympios [Haurat et al. 1994, Braesch et al. 2003] ou encore ACNOS [El Mhamedi et al. 1998] et MECI [Pourcel et al. 2005].
- Notons enfin l'existence d'outils souvent associés à tout ou partie d'une des approches décrites ci-dessus (CIMOSA-RG, ARIS toolset, FirstSTEP, PROPLAN, Mega Process, MooGoo, GRAISoft 1.0...) et qui sont discutés et comparés pour la plupart dans [Oryx 2003].

Cette profusion de concepts et de langages, de méthodes et d'approches, a alors provoqué une prise de conscience bien justifiée dans l'esprit des chercheurs et des industriels qu'ils soient utilisateurs finaux ou développeurs de solutions de modélisation, de systèmes d'information ou de tout autre type d'applicatif. La modélisation d'entreprise pourrait définir un ensemble de concepts essentiels, communs à tous ou possédant des équivalents dans telle ou telle approche ou tel langage.

Ce faisant, il devient alors possible d'échanger des modèles et des points de vue construits à partir d'outils différents<sup>19</sup> en respectant une certaine sémantique. Cette idée de concevoir en quelque sorte une approche universelle [Kosanke et al. 1997] s'est concrétisée avec le projet UEML (Unified Enterprise Modelling Language) [Vernadat 2001, Petit et al. 01, UEML 2003]. Il propose en fait plutôt un langage pivot entre des langages existant ainsi que des définitions de concepts et de relations entre ces concepts dont les futurs langages de modélisation

---

<sup>19</sup> L'outil étant l'objet qui permet de manipuler le langage et ses concepts, on ne le prendra pas en considération dans la suite du document.

d'entreprise devraient s'inspirer. UEML n'est donc pas un nouveau langage de modélisation à proprement parler mais un langage facilitant l'interopérabilité [Daclin et al. 2005] entre outils de modélisation d'entreprise.

Cependant, l'intérêt accordé aux phases de vérification et de validation, voire de qualification et de certification, positionnées dans la Figure 16, était et reste encore relativement limité dans ces approches.

Cette Figure 16 fait en effet apparaître trois niveaux de modèles. Le modèle AS-IS a pour objectif de représenter le système entreprise tel qu'il existe et sur lequel il faudra ensuite se baser pour proposer les évolutions nécessaires. Le modèle TO-BE représente alors cette évolution, c'est-à-dire ce que ce système doit devenir pour couvrir les nouvelles exigences des utilisateurs. Enfin, le modèle d'implémentation précise le passage ou l'interprétation entre le monde des modèles et le monde technologique et organisationnel réel.

Ces modèles ne sont pas nécessairement développés les uns à la suite des autres et plusieurs versions de chacun peuvent s'avérer nécessaires. Ensuite, chaque vue peut nécessiter de disposer à son tour de plusieurs modèles. Premier scénario, tous ces modèles sont établis avec un langage unique de modélisation choisi pour son aptitude à rendre compte des concepts liés à cette vue.

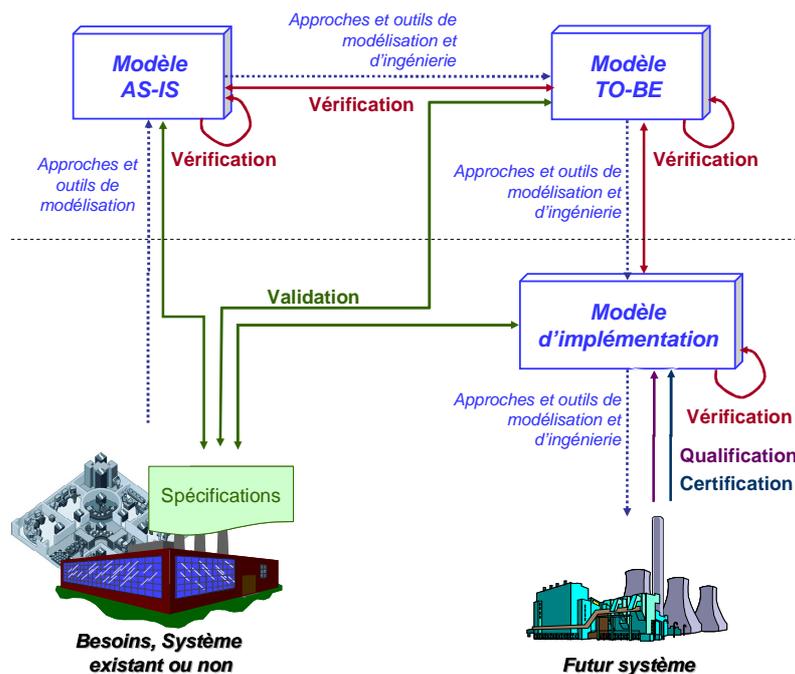


Figure 16 : Places de la VVQC en modélisation d'entreprise

Chaque modèle peut par exemple représenter un niveau de détail de plus en plus fin. Ces modèles sont donc liés entre eux par une relation de raffinement, c'est à dire de décomposition (topologique, fonctionnelle, comportementale ou encore structurelle selon la vue). Ce raffinement fait alors apparaître de nouveaux modèles établis à partir du même langage de modélisation. Deuxième scénario, plusieurs langages de modélisation s'avèrent utilisables. Des modèles sont alors élaborés avec ces langages mais ils entretiennent alors une relation de raffinement différente puisqu'il s'agit ici plus d'une notion d'équivalence ou de substitution. Les concepts mis en œuvre dans ces langages de modélisation peuvent en effet

être différents (en tout cas être sujets à interprétation) ou homonymes bien qu'éloignés sémantiquement ou encore complémentaires les uns des autres.

La Vérification est donc nécessaire pour s'assurer de la cohérence d'un modèle isolé ou de plusieurs modèles à chacune des trois étapes de modélisation, à l'intérieur de chaque vue en tenant compte des deux types de relations de raffinement qui sont possibles et des caractéristiques des langages utilisés. La validation reste nécessaire pour s'assurer de la pertinence de chacun de ces modèles et de chacune de ces vues vis-à-vis de la réalité.

Ces deux tâches trouvent ainsi tout leur intérêt, par exemple, dans le cadre de :

- **L'aide à la décision** : comme dit plus haut, une décision dans un projet (restructuration d'un atelier pour faire face à une opportunité, acquisition de ressources supplémentaires, modification du code de contrôle commande d'un îlot de production, recherche d'un ordonnancement idéal, etc.) se justifie usuellement à partir de l'évaluation ou de l'interprétation de modèles du problème, du système cible, etc. Il faut donc disposer d'un modèle pertinent et fiable, c'est-à-dire vérifié et validé avant son exploitation dans une phase de décision. Il est ensuite possible d'utiliser les mêmes mécanismes de vérification (cohérence dans une situation ou une configuration donnée) et de validation (paramétrage de situation, simulation, expertise, etc.) pour exploiter ce modèle.

- **L'interopérabilité** [Cabral et al. 2006, Chen 2003, Stegwee et al. 2004, Touzi 2006] qui se définit selon [IEEE 1990] comme *'the ability of two or more systems or components to exchange information and to use the information that has been exchanged'*. L'interopérabilité est donc un problème récurrent qui intervient à tous les moments où l'échange et l'interprétation de connaissances, dont des modèles, sont nécessaires. Par exemple, dans le cadre plus opérationnel des systèmes d'information, [Kalfoglou et al. 2004] définissent l'interopérabilité comme *'la capacité à communiquer, coopérer et échanger des modèles ou des données entre deux ou plusieurs applications malgré les différences dans les langages d'implémentation, les environnements d'exécution ou les modèles d'abstraction'*. Il paraît donc intéressant de s'assurer de la conformité d'un service, de l'adéquation d'une donnée ou de la cohérence d'un échange et de disposer pour cela de mécanismes de vérification et de validation des modèles décrivant ces services, ces données ou ces échanges. Il est bien évident que l'on se positionne implicitement ici dans un univers où 'tout est modèle' tel qu'il est proposé dans l'approche MDA (Model Driven Environment) [Bézivin et al. 2001, MDA 2001]. Celle-ci considère effectivement que les modèles sont la base de toute communication.

- **La certification** [Bernus 2003, Balci 2002] : la certification d'un système passe par des représentations qui sont, elles mêmes, sujettes à caution tant qu'elles ne sont pas validées, donc vérifiées. Cette certification ne nécessite-t-elle donc pas que les modèles qu'elle va manipuler passent par un cycle de VVQC ?

- **Le management de la connaissance** : l'activité de V&V nécessite souvent plus d'information que celle contenue dans le seul modèle pour être sûr d'atteindre l'objectif de qualité et de complétude d'une preuve. Cela devient alors une opportunité pour le modelleur de vouloir comprendre et décrire cette information supplémentaire car elle ouvre considérablement son champ de vision. Par exemple, valider un modèle de protocole de

communication peut nécessiter de disposer de plus d'information que celle contenue dans le seul modèle décrivant l'enchaînement des phases du protocole.

- **Le système d'information** : un système d'information est à la base un système à la fois technique, technologique et humain chargé de collecter et de stocker puis de traiter selon des procédures établies un ensemble d'informations. On le considère aujourd'hui comme un système de gestion de connaissances qui doit aussi s'assurer de la cohérence des données, des informations et des connaissances [Braesch et al. 2003], de leur intégrité, de leur enrichissement (croisement, confortation, fusion, exploration par des techniques de data mining, etc.) et de leur mise à disposition au bon endroit et au bon moment selon des formats d'échange reconnus comme XML (eXtensible Markup Language) [Yergeau et al. 2004]. C'est enfin un système que l'on voit de plus en plus s'ouvrir vers de nouveaux modes de communication induits par les nécessités du marché (commerce électronique entre autres), les technologies émergentes et portables, les nécessités de nomadisme et de partage d'information et de navigation via le web avec les notions de portail, de systèmes décentralisés et distribués d'entrepôts de données, etc. On assiste effectivement au passage d'un '*data driven environment*' à un '*cooperative information and knowledge-driven environment*'. L'ingénierie d'un tel système est ainsi un projet réellement complexe dans lequel les notions de V&V (voire de VVQC) deviennent incontournables.

- **La gestion du risque** [NASA 2001, CAS 2003] : l'objectif ici est de mieux formaliser et aider dans la détection ou l'émergence des situations de risque opérationnel, technique, humain, organisationnel, ...

- **La génération d'applicatifs** tels que, par exemple, workflows [Van der Aalst 2000], EAI [Archware 2004, Leymonerie 2004], ERP et PGI [Badoual 2004, Darras et al. 2002]. La mise en œuvre automatisée de modèles d'implémentation permet d'obtenir un code plus sûr, de mettre en œuvre des approches basées sur les composants plus rigoureuses en s'assurant au moyen de techniques de vérification d'une meilleure adéquation aux besoins.

- **L'aide à la détection et au diagnostic** d'erreurs de modélisation, de détecter des dysfonctionnements et d'analyser l'impact que pourrait avoir une situation donnée sur le système réel par exemple en se concentrant sur le rôle des ressources comme proposé dans [Koubarakis et al. 2002]. Cela fait généralement appel à des outils de validation tels que ceux supportant la simulation du modèle de comportement du système, son émulation ou plus simplement son expertise.

Cette liste d'intérêts potentiels est largement non exhaustive. C'est sur cette base que nous avons alors cherché à caractériser quelle était la réelle capacité d'analyse de certaines approches de modélisation d'entreprise, de certains outils et d'un nombre assez conséquent de langages. Par capacité d'analyse, j'entends ici la capacité d'une approche, d'un langage ou d'un outil à mettre en œuvre une stratégie de vérification et de validation. Ces stratégies sont basées sur l'utilisation de techniques existantes comme celles recensées à l'occasion de cette recherche et celles mises en avant par de nombreux auteurs dont [Love 2003, Jagdev 1995, RPG 2001, NASA 2003, Balci 2002]. Ces techniques sont détaillées dans la Figure 17 en respectant la classification déjà introduite dans la Figure 8.

Cette caractérisation nous a ainsi amenés à considérer 4 stratégies pour assurer vérification et validation, et rendre ensuite possibles les tâches de qualification et de certification :

- **L'utilisation de standards** [Schekkermann 2003b] : le processus de modélisation peut être guidé et donc respecter un certain nombre de cadres de référence, de règles édictées sur la base de modèles de maturité, d'architectures, de constructs génériques voire de simples règles de modélisation et de bonnes pratiques comme proposé dans [Revelle 2002]. Un modèle est construit en suivant une sorte de canevas plus ou moins rigoureux qui permet de réduire la possibilité d'erreur de modélisation ou de mésinterprétation. Cette stratégie n'est effectivement pas suffisante pour assurer un objectif de vérification ou de validation mais reste encore la plus simple à mettre en œuvre pour éviter la construction de modèles non pertinents

	<i>Aspect Statique</i>	<i>Aspect Dynamique</i>
<b>Non formel</b>	Reference models and reference architectures utilization, Audit, Human expertise, Face Validation , Reviews (models, project), Walkthroughs, Desk Checking, Inspections, Turing Test Automated documentation generation, Models comparison (by human expert)	
<b>Semi-formel</b>	Cause-Effect Graphing Data Analysis (data dependency, data flow) Interface Analysis (model interface, user interface) Structural Analysis Syntax Analysis Control Analysis (calling structure, concurrent process, control flow, state transition) Fault/Failure Analysis Semantic Analysis Symbolic Evaluation Traceability Assessment Automated documentation generation	Acceptance Testing, Assertion Checking, Bottom-Up Testing Compliance Testing (authorization, performance, security standards) Execution Testing (monitoring, profiling, tracing, reporting) Field Testing, Graphical Comparisons, Object-Flow Testing Predictive Validation, Regression Testing, Statistical Techniques Structural testing (White-Box), Functional testing (Black-Box) Testing (branch, condition, data and controls flow, loop, path, path condition, statement, ) Debugging (symbolic, classic) , Comparison Testing Fault/Failure Insertion Testing, Interface Testing (data, model, user) Partition Testing, Product Testing, Sensitivity Analysis Special Input Testing (boundary value, equivalence partitioning, extreme input, invalid input, real-time input, self-driven input, stress, trace-driven input) Sub-model/Module Testing, Top-Down Testing, Visualization/Animation
<b>Formel</b>	Formal methods utilization (B,Z,VDM; other) and associated tools Induction, deduction, abduction, model checking, theorem proving, Inference, Inductive Assertions, Proof (correctness, completeness, consistence), Properties proof, Model mapping Predicate transformations, Predicate Calculus, Logic (temporal, propositional, first order, etc.), Algebra (linear, process algebra, dedicated algebras), Lambda calculus Simulation (when based on formal behavioral rules and models), Bi simulation	

Figure 17 : Techniques de vérification et de validation [Love 2003, Jagdev 1995, RPG 2001, NASA 2003, Balci 2002]

- **L'expertise** : le modèle contient bien évidemment une partie seulement de la connaissance nécessaire pour représenter le système entreprise. C'est avec leurs connaissances, leurs hypothèses implicites et leur savoir-faire que des experts peuvent effectivement interpréter ce modèle en contexte. Ils peuvent en tirer un certain nombre de connaissances supplémentaires et baser leurs actions sur ces connaissances. Cette stratégie ne permet pas de vérifier le modèle car elle repose uniquement sur la perception, le niveau de connaissance et d'expertise d'un acteur humain. Cette expertise est par exemple mise en œuvre pour interpréter des résultats issus d'une simulation ou pour décider plus directement de la 'qualité' du modèle.

- **L'exécution** : cette approche reste effectivement la plus populaire, sans doute la mieux outillée [Kelton et al. 2001] et elle est considérée comme suffisante dans nombre de cas

[Greasley 2000]. Elle est cependant sujette à discussion puisqu'elle nécessite, d'une part, de disposer d'une sémantique opérationnelle unique et non ambiguë permettant l'exécution effective du modèle. D'autre part, elle nécessite souvent le développement de modèles dédiés dits de simulation [Derrick et al. 1995, Hamri 2004], devant être 'alimentés' au cours de leur exécution par des scénarios définis a priori et gommant ainsi des comportements objectivement ou subjectivement 'oubliés' qu'il serait pourtant intéressant d'analyser. De même, l'émulation d'un modèle nécessite des règles de traduction non ambiguës et formelles permettant effectivement d'exécuter un modèle équivalent à celui en cours d'étude. Les techniques d'analyse basées sur la simulation, l'émulation ou, plus généralement, le test de modèle en exécution, sont largement utilisées pour vérifier expérimentalement que l'on obtient des résultats corrects à partir d'un échantillon de données initiales. Cela rassure quelque peu l'utilisateur mais n'exclut pas des résultats erronés en raison de la non exhaustivité des cas envisagés.

- **La tentation d'utiliser des approches formelles** : comme nous l'avons vu plus haut, les méthodes formelles offrent la possibilité d'une preuve rigoureuse pouvant être considérée comme contradictoire dans le sens où un contre exemple démontre la non véracité d'une propriété. Certains travaux en modélisation d'entreprise se sont effectivement orientés vers des approches plus formelles [Dindeleux 1998]. On peut citer bien sûr le langage PSL [Bock et al. 2004] qui intègre des mécanismes de vérification des spécifications (DEM). De même, d'autres travaux [Hilger et al. 1990, Dubois et al. 1998] ont abordé le problème de formalisation des processus d'entreprise. Ainsi, le langage Albert II [Petit et al. 1997, Dubois et al. 1994] permet une description formelle des besoins afin de faciliter leur validation grâce à la génération de scénarios. Ces travaux se rapprochent notamment des besoins de validation liés à l'approche CIMOSA. De même, des tentatives de modélisation de processus (essentiellement des processus manufacturiers dans ce cas de figure) au moyen d'algèbres telles que proposées dans [Canuto et al. 1998, Donati et al. 1997] permettent de disposer d'une formalisation intéressante autorisant certaines vérifications. Cependant, l'usage de telles méthodes reste délicat, relativement coûteux en temps si l'on souhaite atteindre un bon niveau de preuve [Rakitin 2001, King et al. 2000] et elles ne sont évidemment pas utilisables ou pertinentes selon le projet du modéleur. Celui-ci doit en outre posséder une bonne connaissance et manipuler des concepts relativement abstraits ou tout au moins difficilement compréhensibles ou comparables à la réalité pour les autres acteurs du projet. On note donc une contradiction évidente et forte entre l'exhaustivité promise et le niveau d'implication de la part du modéleur en termes de temps passé, de ressources financières engagées, de niveau de connaissance, etc. D'autre part, bien que fournissant une preuve irréfutable, ce type de techniques n'est envisageable que si le langage de modélisation utilisé pour bâtir le modèle est basé sur un formalisme autorisant l'expression et la vérification de propriétés. Cependant, l'usage de tels langages formels nécessite un compromis entre puissance, pertinence, rigueur, lisibilité du modèle et l'expression des propriétés [Lamboley 2001]. En particulier, la manipulation des outils de preuve actuellement disponibles nécessite une compétence et des délais de modélisation dont l'acteur au sein d'une entreprise ne pourra facilement disposer.

Enfin, concrètement mises en œuvre, ces stratégies sont utilisables à différentes étapes présentées dans [Balci 1998] mais rappelons cependant que cet usage reste dépendant. :

- **Du rôle de l'utilisateur** : est-il un développeur qui manipule des modèles fonctionnels, de données et de comportement d'un futur ERP? Est-il un ingénieur qui utilise, cherche à améliorer ou réutilise un modèle élaboré avec une technique donnée ? est-il un consultant en charge du choix du meilleur outil possible pour une utilisation donnée et qui utilise alors un benchmark ? est-ce un vendeur d'applicatif désirant démontrer la capacité de son logiciel dans différents cas d'utilisation ?
- **Du projet de l'utilisateur** : durée possible, temps allouable aux phases de V&V, outils de (ou d'aide à la) V&V disponibles, degré de criticité du projet, niveau d'implication de l'utilisateur...
- **Des objectifs de l'utilisateur** : veut-il seulement avoir confiance dans sa représentation ? Veut-il pouvoir réutiliser, maintenir ou raffiner des modèles existants ? Veut-il étudier une situation, un phénomène, la dépendance d'un système ?...
- **Du niveau et de l'organisation de l'utilisateur** : compétence, connaissances, méthode employée et langage de modélisation avec lequel le modèle est exprimé.

En résumé, les constats suivants peuvent être faits :

- Il existe nombre d'axes de progrès pour mener à bien l'analyse de modèles d'entreprise et un intérêt potentiel grandissant de la part des différents utilisateurs pour une analyse de qualité, susceptible de donner lieu à une argumentation rigoureuse, exhaustive et, si possible, rapide. Cependant, cette prise de conscience reste lente. Le travail que j'ai initié au niveau du Technical Committee TC 5.3 'Enterprise Integration and Networking' en créant le sous-groupe 'Verification, Validation and Accreditation for Enterprise Models' (VV&A EM) tente de démontrer l'intérêt de ces axes émergents. Je cherche dans ce groupe à construire un espace où industriels et chercheurs de toutes les disciplines concernées peuvent échanger, proposer et définir un projet de développement d'une boîte à outils de VVQC.
- Le niveau de formalisation normalement requis pour faciliter l'intégration de telles techniques dans la modélisation d'entreprise n'est pas obligatoirement élevé. Le fait de proposer des approches formelles peut même s'avérer contradictoire avec les objectifs de la modélisation d'entreprise et certaines avancées concernant la modélisation de systèmes peu formalisables [Vallespir 2003] : compréhension, communication, décision, raisonnement sur des phénomènes complexes effectivement quelquefois difficilement formalisables et pouvant être seulement approchés en termes de modélisation.
- Le modéleur a un niveau de connaissances relatif à son métier et ne fait finalement que des incursions dans la modélisation d'entreprise, à fortiori dans la vérification formelle et la validation.

Ce sont ces constats mais aussi des besoins plus précisément formulés lors de projets en partenariat avec des industriels (voir page 124) ou au contact avec d'autres chercheurs dans divers cadres académiques (voir page 128) qui m'ont permis, de proche en proche, de formuler des verrous scientifiques et technologiques afin d'y apporter des solutions.

Ces verrous peuvent se formuler aujourd'hui comme suit:

- **D'un point de vue scientifique**, comment gagner en confiance, cohérence et consistance dans les modèles d'entreprise au moyen d'approches plus formelles ? Comment

utiliser certaines de ces techniques formelles pour analyser ces modèles à d'autres fins (risque, interopérabilité, etc.) ?

- **D'un point de vue technique**, quels sont les mécanismes à développer et à mettre en œuvre pour vérifier et valider ? Quels impacts et quelles améliorations faut-il éventuellement apporter à certains langages de modélisation existants ?

## **2 - DEMARCHE**

La démarche de travail de 1997 à 2007 s'est construite graduellement en quatre étapes essentielles plus ou moins séquentielles pour des raisons de faisabilité, de ressources et de cohérence.

Il a tout d'abord été nécessaire de tester, d'évaluer et de se doter de démarche, de langages et d'outils de modélisation d'entreprise. Il fallait donc soit les acquérir quand ils existaient et couvraient certains besoins, soit en concevoir de nouveaux pour répondre à des besoins précis. C'est ce qui a été fait avec développement du langage de modélisation de processus MOV et du méta modèle CANEVAS.

Il fallait ensuite définir comment la vérification pouvait apporter quelque chose à la modélisation d'entreprise, et surtout proposer une alternative formelle aux techniques utilisées. Cela a débouché sur la conception d'un modèle de propriété baptisé CREDI et d'un langage de modélisation baptisé LUSP.

Une fois le concept de propriété défini, il fallait alors s'intéresser à la problématique de la preuve elle-même de propriété. Cela a débouché sur la proposition d'utiliser des graphes conceptuels et sur la définition d'un référentiel de propriétés génériques.

Enfin, il m'a paru intéressant de prouver, par une application concrète dans un domaine en plein renouveau, le risque, l'intérêt des travaux de modélisation et de vérification entrepris jusqu'à présent.

J'ai pour cela encadré les travaux de quatre doctorants et de deux DEA dont les problématiques, les démarches de recherche et les résultats sont détaillés dans la suite du document sous forme de contributions à la modélisation et à la vérification.

## **3 - MODELISATION : CANEVAS ET MOV**

### **a - Problématique**

Un projet de recherche a été initié pour la société Merlin Gerin sur le thème de la réduction et de la maîtrise des aléas de production dans des systèmes de production complexes. La problématique était double. Il fallait d'abord fournir aux différents acteurs de l'entreprise un moyen de modéliser les différents processus de production dans lesquels ils étaient impliqués. Il fallait que le langage de modélisation leur permette de décrire comment la valeur ajoutée de chaque processus pouvait varier au cours du temps et quelles pouvaient en être les causes autres que des causes techniques ou technologiques.

En d'autres termes, il fallait disposer d'un langage de modélisation de processus permettant de décrire comment les compétences des ressources humaines pouvaient impacter la performance locale ou globale d'un processus donné. Le but n'était pas une approche punitive ni une approche corrective des moyens techniques. Il s'agissait d'une approche de détection d'amélioration potentielle de la qualité, des coûts et des délais en reposant seulement sur la notion de compétence.

Les langages de modélisation de processus tels que ceux proposés par CIMOSA, PSL ou Aris se sont très vite avérés trop complexes à manipuler d'une part, et insuffisamment dotés de mécanismes de vérification, de validation et d'analyse de la performance.

## b - Contribution

J'ai tout d'abord initié et participé au développement du langage de modélisation de processus baptisé MOV (Modélisation Orientée Valeur ajoutée).

Ce langage permet de décrire les processus<sup>20</sup> qu'une organisation de production est susceptible de devoir mettre en œuvre, de maintenir et d'améliorer de manière continue pour remplir sa mission. Il met en avant une logique de modélisation nécessairement très simpliste, donc basée sur un nombre limité de concepts essentiels pour être utilisable par tout le monde dans l'entreprise. Ces concepts sont synthétisés dans le méta modèle donné Figure 18 et la Figure 19 montre un exemple de modèle de processus.

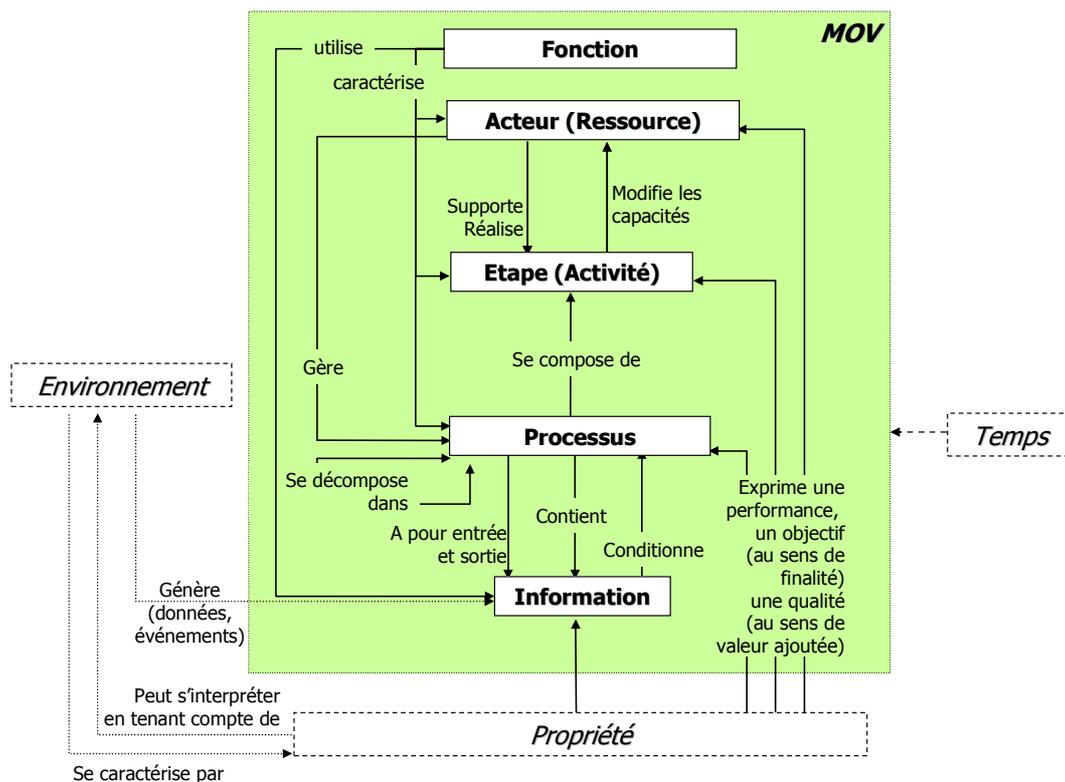


Figure 18: Méta modèle du langage de modélisation MOV

Ce langage de modélisation, outre la structure et l'organisation de l'entreprise, permet de manipuler la notion de valeur ajoutée possible et souhaitée.

<sup>20</sup> Les processus [Braesch 95] peuvent être de type métier (ou encore client), de type support ou de type pilotage.

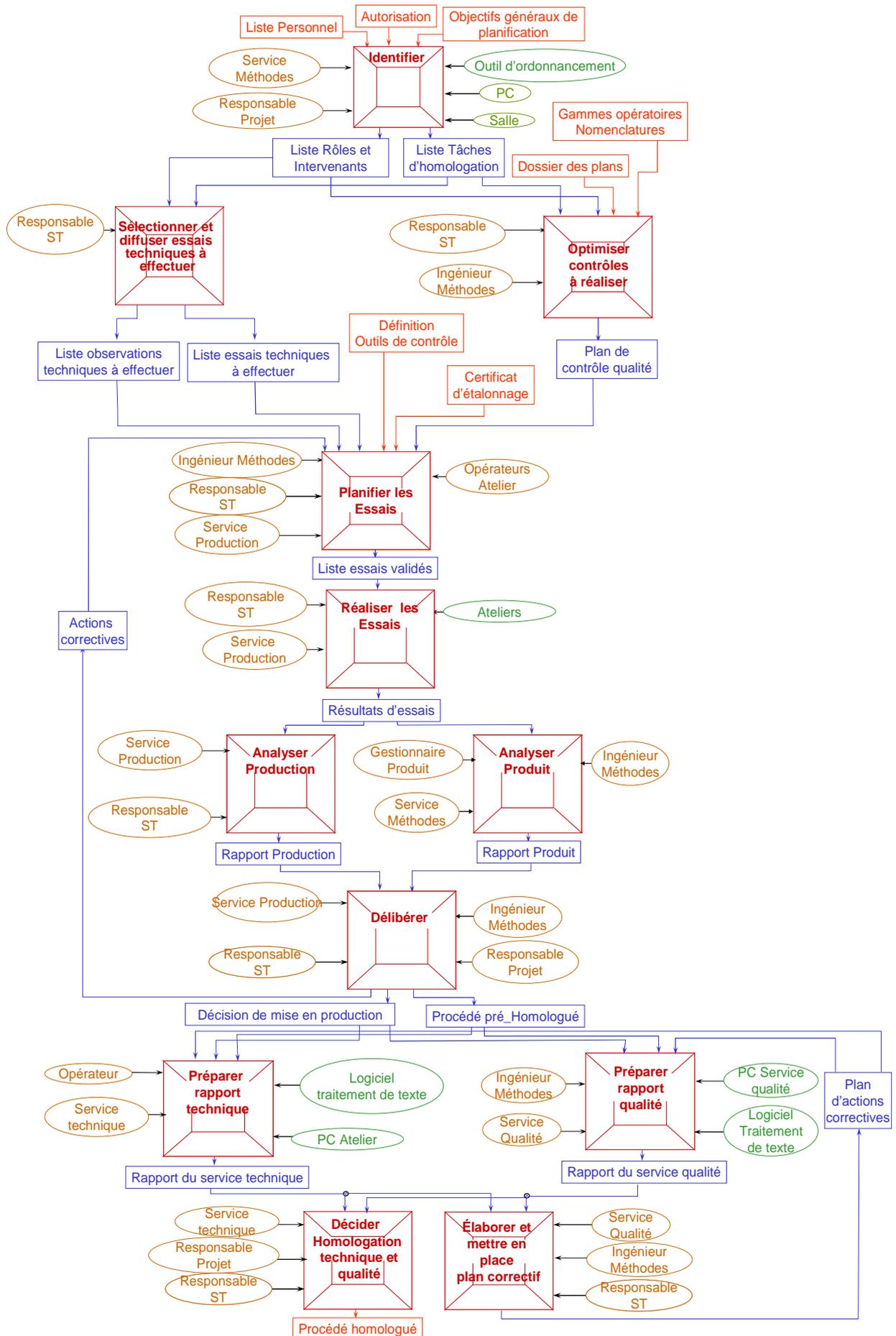


Figure 19 : Exemple de modèle de processus d'homologation

La valeur ajoutée est une façon de décrire et d'estimer la performance conférée par chaque action menée à bien dans l'entreprise et par chaque acteur remplissant une tâche durant cette action. En effet, en s'inspirant des travaux de [Mayer 1995], on peut énoncer que chaque ressource doit :

- **Savoir** mettre en œuvre de manière concrète et performante une compétence.
- **Devoir** posséder une ou plusieurs compétences reconnues et utiles.
- **Pouvoir** mettre en œuvre chacune de ces compétences dès que nécessaire en respectant des objectifs de délais, de coûts et de qualité.
- **Avoir** la possibilité d'acquérir de nouvelles compétences ou d'améliorer des compétences existantes.

Chaque action doit ensuite :

- **Savoir** faire appel à une ou plusieurs compétences reconnues et disponibles dès que nécessaire (au bon endroit et au bon moment).
- **Devoir** utiliser les compétences existantes ou s'en satisfaire si nécessaire pour maximiser sa performance.
- **Pouvoir** permettre aux acteurs de mettre en œuvre leurs compétences dans les conditions requises et souhaitées.
- **Avoir** la possibilité de mettre en œuvre de nouvelles compétences en remplacement de compétences devenues obsolètes.

Ces attentes exprimées en termes de devoir, savoir, pouvoir et avoir sont ramenées à une liste de douze critères choisis par l'industriel et donnés dans le Tableau 5.

Décider	Communiquer
Créer	Organiser
Transformer	Coopérer
Négocier	Réaliser
Entreprendre	Gérer
Animer	Diriger

Tableau 5 : Les critères de valeur ajoutée retenus

Ainsi, chaque activité d'un processus, chaque acteur impliqué, chaque processus vu alors à un niveau plus macroscopique, doit être caractérisé par la valeur ajoutée en termes de décision, de communication, etc. qu'il confère à son système englobant, l'entreprise.

Cette valeur ajoutée est décrite par une fonction exprimée de proche en proche en respectant trois niveaux de complexité croissante, ce qui en fait un outil de description relativement aisé à manipuler.

- **Niveau 1** : à ce niveau, le modelleur indique seulement si l'entité concernée (l'acteur, l'étape ou le processus) possède ou ne possède pas cette valeur ajoutée. Ce choix binaire permet de comprendre un peu mieux l'organisation sans pour autant juger des réelles forces et faiblesses de celle-ci.

- **Niveau 2** : le modelleur peut fixer la valeur numérique de chaque critère en respectant une échelle de valeur unique pour chaque critère et pour l'ensemble du modèle. C'est bien

entendu une vision statique qui permet de raffiner encore le niveau 1. La Figure 20 montre un exemple sur un des processus d'homologation de l'industriel.

- **Niveau 3** : afin d'obtenir une vision plus dynamique de l'évolution de la valeur ajoutée, celle-ci est alors décrite par une fonction numérique. Celle-ci est paramétrée en fonction des attributs des acteurs, des activités et des autres processus. Par exemple, la valeur ajoutée de communication qu'une ressource humaine peut apporter à une activité peut croître linéairement avec le nombre d'années de pratique. Elle peut ensuite atteindre un maximum avant de décroître quand l'acteur se lasse de ce rôle.

Niveau 2		Critères de Valeur Ajoutée										
Etapas		Communiquer	Coopérer	Créer	Décider	Entreprendre	Négocier	Organiser	Réaliser	Animer	Diriger	Gérer
Planifier l'homologation		10,0	20,0		50,0			15,0		5,0		
Sélectionner et diffuser les essais		25,0			25,0				50,0			
Optimiser contrôles à réaliser		50,0			50,0							
Vérifier homologation		40,0		40,0	20,0							
Planifier les essais		10,0	20,0		20,0		30,0	20,0				
Réaliser les essais									100,0			
Faire l'analyse technique		30,0							70,0			
Faire l'analyse qualité		30,0							70,0			
Analyser la production		30,0							70,0			
Analyser le produit		30,0							70,0			
Décider de l'homologation					50,0				20,0	30,0		
Décider de la mise en production		30,0	10,0		60,0							
		23,8%	4,2%	3,3%	22,9%	0,0%	2,5%	2,9%	37,5%	2,9%	0,0%	0,0%

Figure 20 : Modélisation de niveau 2 de la Valeur Ajoutée

Pour cela, différents profils de fonction, dont certains sont donnés dans la Figure 21, ont été établis et proposés puis mis en œuvre sur des processus problématiques de l'industriel. Ces profils, au demeurant simples, ont permis de faire apparaître des nids de performance encore inexploités car méconnus.

Ce travail a fait l'objet d'un article dans une revue nationale (RN3) et de six articles dans des conférences internationales (CI8, CI15, CI21, CI22, CI28, CI29) en collaboration avec les autres partenaires du projet, en particulier avec le LIRMM de Montpellier.

J'ai développé en parallèle un premier méta modèle pour les langages de modélisation de processus en entreprise. Ce méta modèle, baptisé CANEVAS et dont une vue simplifiée est donnée dans la Figure 22, a pour objectif de servir de méta méta modèle (tel que proposé dans le MDA [MDA 2001, Bézivin 2003]) à des langages de modélisation de processus spécifiques pour d'autres applications industrielles.

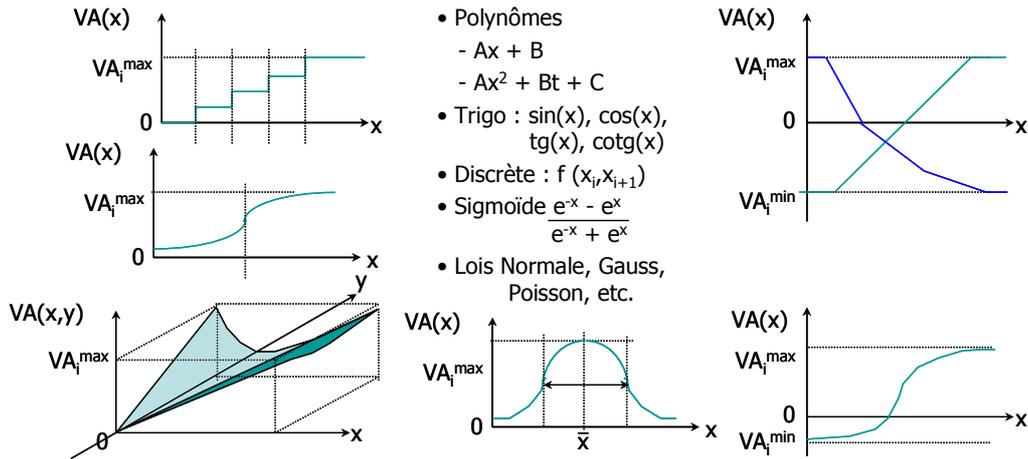


Figure 21 : Profils de Valeur Ajouté (Niveau 3)

Il permet effectivement d'instancier le langage MOV mais aussi de prévoir la création et l'extension d'autres langages de modélisation. Ce méta modèle a fait l'objet d'un article dans une conférence internationale (CI20).

Le langage MOV a fait enfin l'objet du développement d'un prototype de modélisation développé sous GME (Generic Modelling Environment) [GME 2004] qui est actuellement utilisé et dont une copie d'écran est donnée Figure 23.

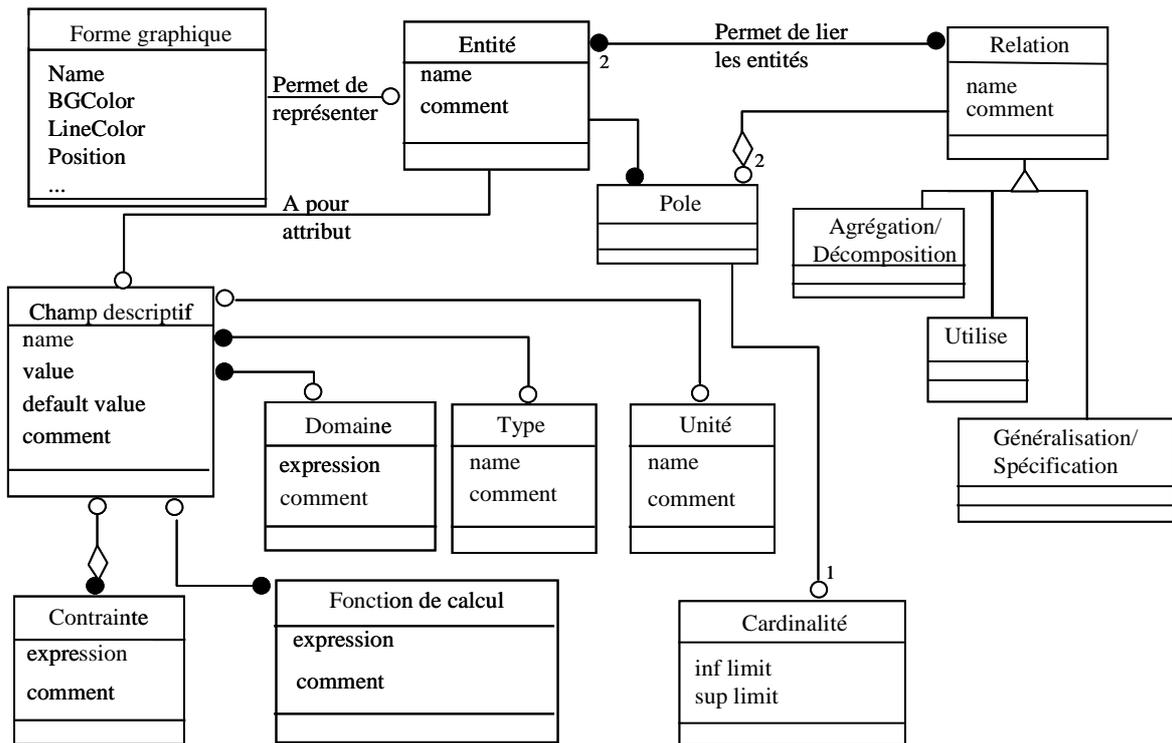


Figure 22: Méta modèle CANEVAS

Du point de vue de l'analyse, un modèle de processus, construit avec le point de vue et le formalisme disponible dans MOV, doit ensuite être vérifié et être utilisé pour rechercher des situations et des comportements aberrants amenant à une perte de valeur ajoutée i.e. de performance, une perte de stabilité et une perte d'intégrité. Une contrainte à prendre en compte était ici aussi de ne pas exiger un niveau de compétence élevé de la part du modéleur / analyseur.

Il apparaît donc une **contradiction** entre la nécessaire transparence des mécanismes d'analyse à mettre en œuvre et l'efficacité ou la pertinence attendue de cette analyse du modèle. Cela m'a amené alors à redéfinir le concept de propriété pour lever en partie cette contradiction.

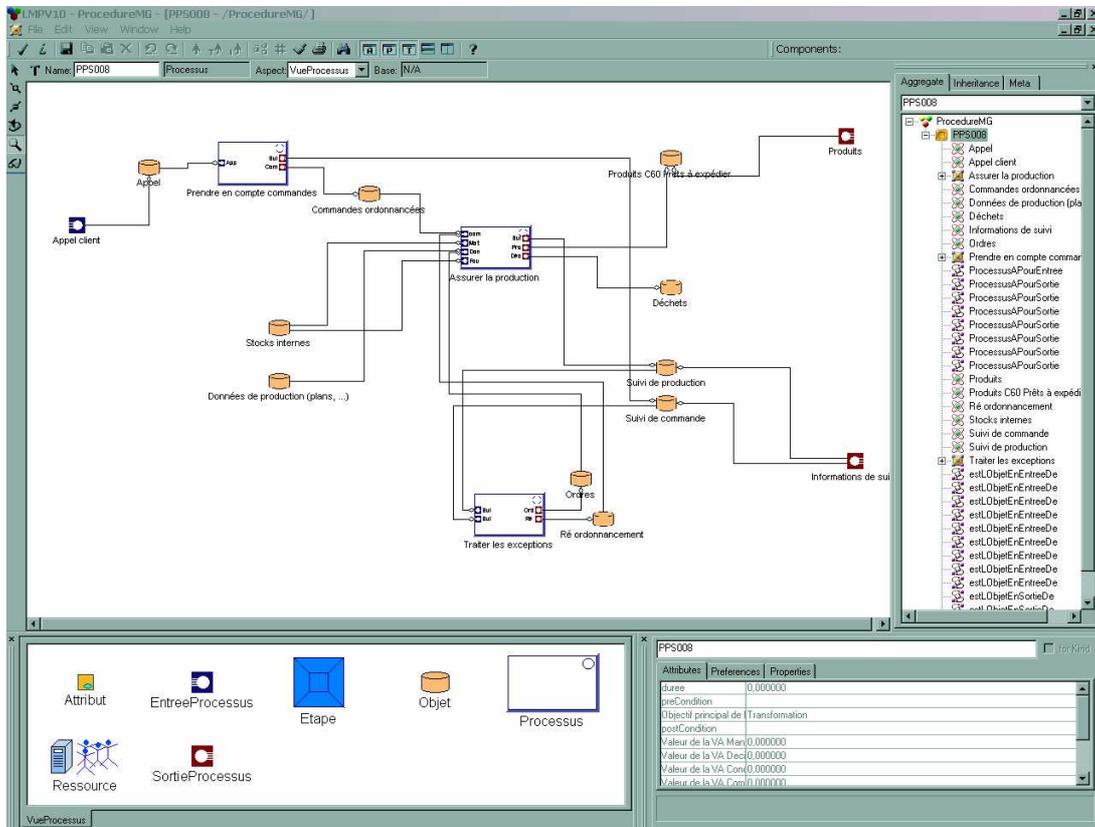


Figure 23 : Editeur MOV

## 4 - MODELISATION : LE CONCEPT DE PROPRIETE

### a - Problématique

Ces questions sont les suivantes :

- Qu'est ce finalement qu'une propriété ?
- Qu'est ce qui la caractérise ?
- Est-ce elle-même une caractéristique d'un système complexe et/ou d'un modèle et/ou d'une connaissance actionnable au sens large ?
- Comment alors vérifier formellement une propriété sur le modèle ?

Le terme de propriété est employé classiquement pour décrire des attentes de type :

- **Sûreté** : quelque chose de mauvais ne doit pas se produire.
- **Vivacité** : quelque chose de bon doit fatalement arriver. On peut aussi parler quelquefois d'**atteignabilité** qui permet de s'assurer qu'une situation ou un état donné du modèle sera toujours atteint tôt ou tard.
- **Sécurité** : quelque chose doit toujours arriver ou son contraire ne doit jamais arriver.

Il existe ensuite différentes façons pour décrire une propriété, essentiellement sur la base de logiques temporelles ou de langages propriétaires tels que ceux proposés déjà dans certains outils de preuve. Enfin, il existe plusieurs classifications possibles des propriétés dont, par exemple, celle proposée par [Meinadier 1998] décrite dans la Figure 24 qui définit les propriétés système.

Devant ces différentes classifications possibles et souhaitées d'une propriété, et souhaitant rester indépendant d'un futur outil de preuve, et gardant à l'esprit le souci d'autonomie du modéleur, j'ai donc encadré la thèse de E.Lamine (T1 avec un taux d'encadrement de 50%), ainsi que deux DEAs (DEA5, DEA6).

**Fonctionnalité**

*Conformité du système à toutes les exigences fonctionnelles*

**Comportement**

*Débit et temps de réponse  
Ordonnancement des actions  
Respect des contraintes temporelles  
(échéances, temps réel, réactivité)*

**Robustesse**

*Fonctionnement en conditions limite d'alimentation et d'utilisation des ressources  
Comportement face à des stimuli limites ou anormaux*

**Conditions d'ambiance**

*Respect des normes en matière d'effets sur l'environnement*

**Limites de charges**

*Détection des seuils de saturation par chargement progressifs*

**Sûreté de fonctionnement**

*Reconfiguration lors de la détection de pannes ou de stimuli anormaux*

**Sécurité**

*Innocuité du système par rapport à son environnement  
Immunité du système face aux agressions potentielles de l'environnement*

**Ergonomie**

*Ergonomie opérationnelle*

**Qualité**

*Propriétés déduites des métriques à respecter*

Figure 24 : Les propriétés d'un système selon [Meinadier 1998]

## b - Contribution

L'objectif de la thèse d'E.Lamine était de préciser le sens et l'objectif d'une propriété puis 'en proposer une formalisation unificatrice et un cadre de spécification formel pour décrire les propriétés d'un système. Nous visions bien entendu des systèmes dans lesquels se côtoient et interagissent ressources techniques et ressources humaines.

Une propriété est une caractéristique intrinsèque (comportementale, fonctionnelle, structurelle ou organique, dépendante ou non du temps) d'une entité (un système, un modèle, une entité de modélisation, un phénomène, etc.).

Toute propriété traduit une attente, une exigence, une finalité à laquelle l'entité doit répondre. Elle représente donc implicitement un grain de connaissance que l'acteur souhaite pouvoir décrire et qui doit pouvoir être vérifiée sur le modèle du système de manière à rassurer l'utilisateur sur la cohérence et la pertinence de sa représentation.

Ce grain de connaissance ne peut souvent pas et, dans certains cas, ne devrait pas nécessiter (pour des raisons évidentes de généricité et de réutilisation) d'être décrit au moyen du langage de modélisation employé. En effet, le formalisme de ce langage ne se prête habituellement pas à la description d'une propriété pour les raisons déjà évoquées plus haut.

Il nous a donc paru nécessaire, d'une part de formaliser plus avant ce concept de propriété pour en fournir un modèle baptisé CREDI et de proposer un langage de spécification baptisé LUSP (Langage Unifié de Spécification de Propriété) permettant de manipuler le modèle CREDI. Enfin, le fait d'adopter des notations formelles donne accès à nombre de techniques de preuve existantes sur le marché comme certains des theorem prover, model checker, outils d'analyse statique, voire de test, de simulation ou d'émulation.

Avant de décrire le modèle CREDI, il est nécessaire de préciser les notions de référent et de granularité qui ont été développées pendant ce travail et sur lesquels se fondent ce modèle CREDI.

- Un **référent** est l'objet de l'étude. Il peut s'agir d'un modèle ou d'un ensemble de modèles élaborés selon une approche de modélisation multi vues, multi niveaux de détail et multi formalismes d'un même système.
- Une **granularité G** est l'ensemble totalement ordonné mais non unique a priori de niveaux de détail appelés degrés de granularité D. Ces niveaux de détail correspondent aux niveaux d'abstraction<sup>21</sup> du référent qui est l'objet de l'analyse. Chaque granularité est donc caractérisée par un type unique pouvant être spatial ou temporel. La Figure 25 montre deux exemples de granularité. Une granularité G est munie :

- D'une loi Min, d'une loi Max et d'une loi + permettant de formaliser la relation d'ordre total entre les degrés d'une même granularité
- D'un opérateur de composition **O** entre les granularités tel que  $G_1OG_2=G_3$

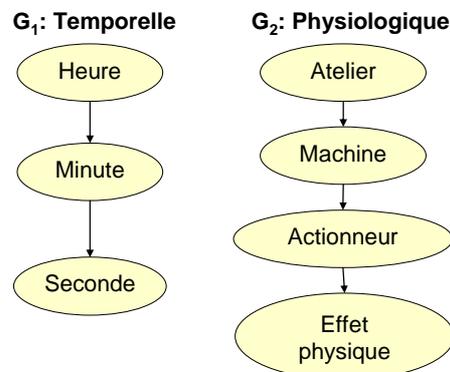


Figure 25 : Exemples de granularités typées

Le modèle de propriété CREDI est un quintuplé :

$$P ::= \langle C_D, E_D, R_{DD}, D'', I_{D''} \rangle$$

Avec :

- $C_D$  est l'ensemble éventuellement vide de faits (variables de modélisation, paramètres de modélisation, prédicats et autres propriétés tels que décrits pour un degré D donné de la granularité dans la Figure 26) appelés causes et appartenant à un degré de granularité D.

<sup>21</sup> J'entends par abstraction le fait de décomposer un référent ou d'en faire une analogie d'où la caractéristique non unique des granularités possibles applicables à un même référent. D'après SAGACE [SAGACE 1999], une décomposition fait en effet toujours apparaître des objets de même nature qu'il s'agisse d'une décomposition physiologique faisant apparaître le référent comme un réseau de référents de plus bas niveau ou d'une décomposition organique (topologique, fonctionnelle, structurelle, etc.). A l'opposé, une substitution fait apparaître des objets de natures différentes de celle du référent : elle permet donc de faire une analogie.

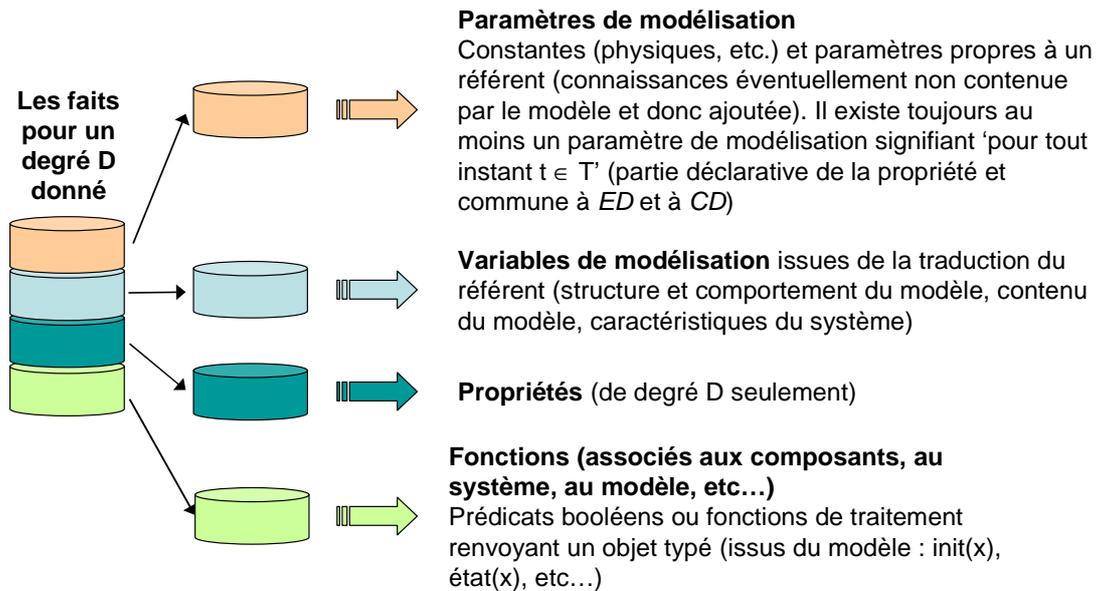


Figure 26 : Les faits contenus dans les ensembles  $C_D$  et  $E_D$

- $E_D$  est l'ensemble, nécessairement non vide, de faits appelés effets. Ils appartiennent à un degré  $D'$  de la granularité  $G$ . En effet, chaque fait est référencé avec un degré de détail donné dans une même granularité choisie par le modeleur.  $D$ ,  $D'$  et  $D''$  sont des degrés de détail respectant les règles suivantes :

- Les faits (causes et effets) appartiennent à un niveau  $D \in G$  ou  $D' \in G$  avec  $D' \in \{D ; D'=D+1 ; D'=D-1\}$ .
- Pour toute propriété  $P$ ,  $P$  est de degré  $D''$  tel que  $D'' = \max(D, D')$  et  $D'' \in G$

- $R$  est la relation de causalité  $R$  typée. Elle se définit par :

$$R ::= \langle \theta_c, \theta_e, \theta_i, T \rangle$$

Avec :

- $\theta_c$  est la fonction cause définie comme suit :

$$\theta_c : T^l \times C_D^m \times \mathfrak{X}^{+n} \rightarrow B$$

$$(t_1, \dots, t_l, c_1, \dots, c_m, r_1, \dots, r_n) \rightarrow \theta_c(t_1, \dots, t_l, c_1, \dots, c_m, r_1, \dots, r_n) \in \{0, 1\}$$

- $\theta_e$  est la fonction effet définie comme suit :

$$\theta_e : T^o \times E_D^p \times \mathfrak{X}^{+q} \rightarrow B$$

$$(t_1, \dots, t_o, e_1, \dots, e_p, r_1, \dots, r_q) \rightarrow \theta_e(t_1, \dots, t_o, e_1, \dots, e_p, r_1, \dots, r_q) \in \{0, 1\}$$

- $\theta_i$  est l'indicateur d'influence défini dans  $\mathfrak{X} : \theta_i \in \mathfrak{X}$

$\theta_i=0 \Rightarrow$  l'influence est nulle

$\theta_i>0 \Rightarrow$  l'influence est positive et d'autant plus importante que  $\theta_i \rightarrow +\infty$

$\theta_i<0 \Rightarrow$  l'influence est négative et d'autant plus néfaste que  $\theta_i \rightarrow -\infty$

- $T$  est l'ensemble des faits communs aux ensembles  $C_D$  et  $E_D : T = C_D \cap E_D$

Tout l'intérêt du modèle CREDI réside en particulier dans le type de cette relation  $R$  qui peut être :

- **Logique** : implication ou équivalence sans notion de temps ou de durée d'application,
- **Temporelle** : les notions d'instant ou d'intervalles de temps permettent de définir, par exemple, la précédence : les causes précèdent toujours les effets,
- **Influence** : la connaissance que l'on a de la cause modifie, avec un sens de variation interprétable qualitativement, l'opinion que l'on a sur l'effet [Pearl 1999],
- **Emergence** : l'effet de la propriété est caractérisé par l'existence d'une autre propriété appartenant à un niveau de détail plus abstrait ou plus grossier [Meinadier 1998].

• L'ensemble I contient les faits pouvant servir d'indicateurs dont l'évolution permet de détecter une possible modification de la véracité de la propriété. Cette notion d'indicateur n'a pas été reprise dans le travail ultérieur.

Une première classification, schématisée Figure 27, a alors été proposée pour caractériser une propriété d'un référent R dans un degré D.

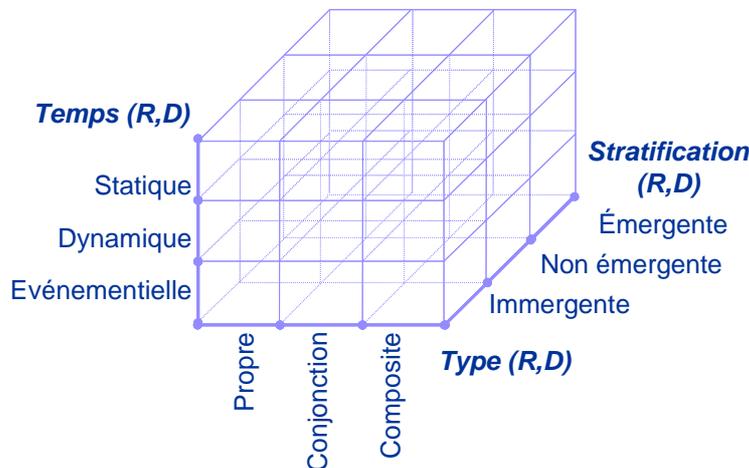


Figure 27 : Première classification des propriétés [Lamine 2001]

Elle met en avant trois axes qui sont :

- **Le temps** : la véracité de la propriété peut en effet être indépendante du temps, être vérifiée pendant certains intervalles de temps ou au contraire à certains instants
- **Le type** : une propriété peut être propre (on peut alors parler d'attribut) auquel cas elle caractérise le référent lui-même. Elle peut être de conjonction car elle caractérise le réseau d'interaction qui existe entre plusieurs composants du système. Elle peut enfin être composite c'est-à-dire référencer un ensemble de propriétés propres et de conjonction. La Figure 28 montre le méta modèle retenu de la typologie des propriétés.
- **La stratification** : une propriété peut avoir pour cause d'autres propriétés vérifiées à un niveau de granularité inférieur auquel cas elle est dite émergente. Elle sera dite immergente si elle est l'une des causes permettant de vérifier une propriété émergente d'un niveau de granularité plus haut. Par défaut, elle sera dite non émergente.

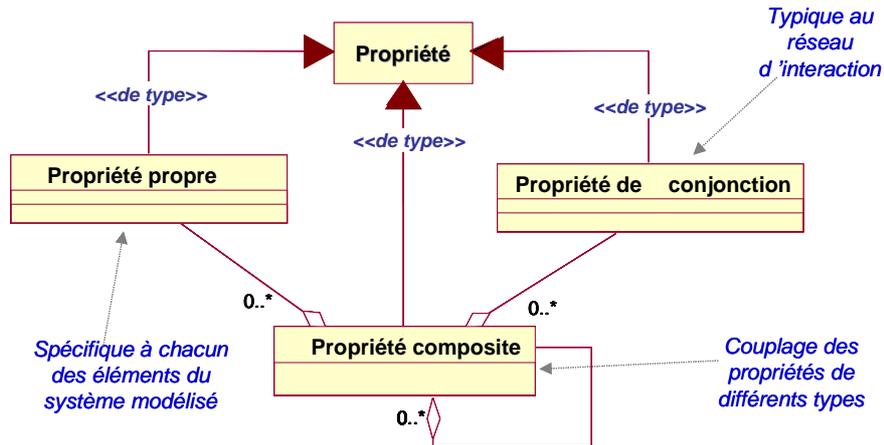


Figure 28 : Méta modèle du type d'une propriété

Une schématisation des différents types est donnée dans la Figure 29.

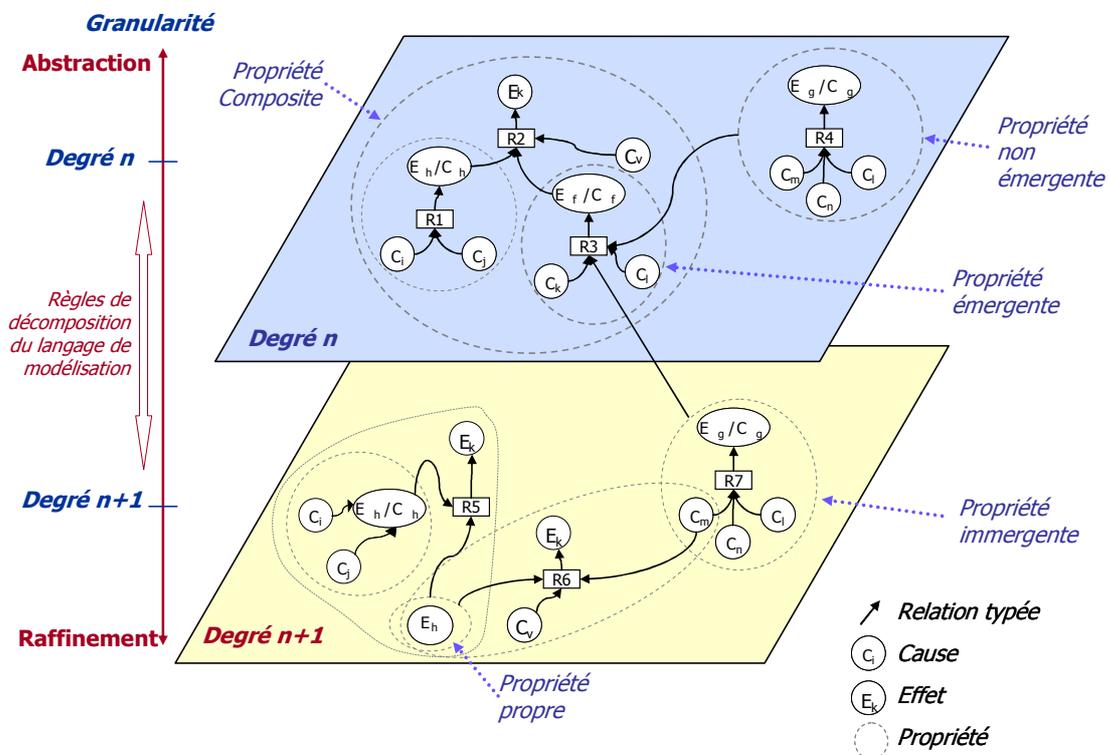


Figure 29 : Types de propriété

Un exemple décrivant une propriété composite est donné Figure 30. La durée pendant laquelle une machine est susceptible d'être productrice ('temps d'ouverture') est la somme de deux durées appelées 'temps d'indisponibilité' et 'temps effectif de production'. Le temps d'indisponibilité est lui-même la somme des deux durées suivantes. La première durée est calculée comme la somme des durées pendant laquelle la machine est en réglage, fabrique une série de pièces mauvaises ou est en panne. Elle est appelée 'temps d'indisponibilité propre' et ne dépend que des caractéristiques de la machine. La deuxième durée est appelée temps d'indisponibilité induite car elle correspond à des temps d'attente non liés à la machine elle-même puisqu'ils dépendent de la disponibilité ou de la suffisance d'équipements, de stocks ou de flux externes nécessaires à la machine. On peut donc décrire une propriété composite 'Indisponibilité d'un moyen de production' comme le couplage entre une propriété

propre dont les effets sont effectivement des caractéristiques de la machine et une propriété de conjonction qui décrit la dépendance de la machine avec d'autres objets de son environnement.

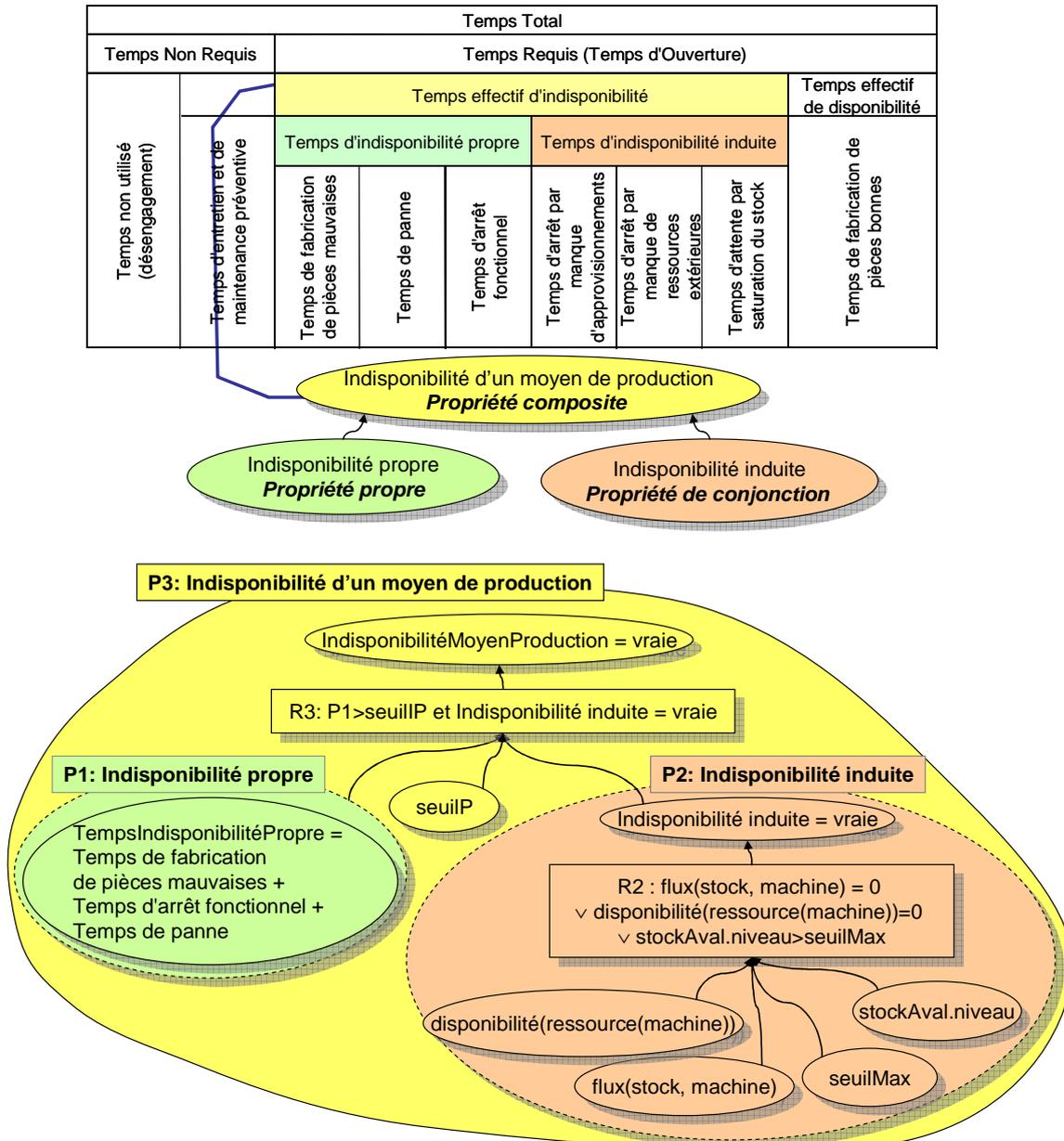


Figure 30 : Exemple de propriété propre [CNOMO 1987]

La spécification de l'ensemble des propriétés d'un référent et pour le degré D d'une granularité donne alors un graphe  $G_D = \langle N, L \rangle$  orienté et hiérarchisé où :

- $N$  est l'ensemble des nœuds causes et effets (les nœuds peuvent contenir des propriétés d'où la nécessité d'une hiérarchisation des graphes selon les degrés) :

$N = \{A = \{f_1, \dots, f_n\} \text{ avec } (\forall i=1 \text{ à } n, i \in N, f_i \in F)\}$  (où  $F$  est l'ensemble des faits (variables de modélisation, paramètres de modélisation, propriétés et prédicats du niveau D)

- $L$  est l'ensemble des relations entre les ensembles causes et les ensembles effets :

$$L = \{R / R = \langle \theta_c, \theta_e, \theta_i, T, I \rangle\}$$

Un même référent peut donc donner un (en l'absence d'une granularité définie) ou plusieurs graphe(s) de propriétés. La connaissance supplémentaire décrite au moyen de ces propriétés est donc aisément manipulable au moyen de ces graphes. En particulier, il devient envisageable de visualiser une trajectoire entre des causes et des effets n'ayant à priori pas de liens et de faire ainsi apparaître des liens de dépendance entre ces faits, liens encore méconnus par le modéleur.

Cependant, analyser une propriété peut entraîner une modification du modèle par le modéleur à des fins de correction, d'amélioration ou de raffinement. Cette modification impacte la totalité des propriétés d'un référent qui doivent être prouvées à nouveau et donc de ces graphes.

Cette thèse a ensuite abouti à une première définition du langage LUSP (Langage Unifié de Spécification de Propriétés) qui est le langage de manipulation du modèle de propriété CREDI.

Le terme «**Unifié**» reflète l'idée d'un langage généraliste, ouvert et indépendant du domaine d'application. Ce type de langage de spécification a par exemple été proposé ensuite par [Accelera 2004] avec le langage PSL (Property Specification Language).

Le terme «**Spécification**» implique ensuite la manipulation des concepts nécessaires, les associations entre ces concepts et de l'ensemble des règles (syntaxe abstraite et concrète, sémantique) couvrant les besoins suivants

- Spécifier les propriétés d'un référent en respectant un modèle de spécification de propriété tel que CREDI mais pouvant être étendu à d'autres types de modélisation de propriétés (LTL, CTL, PSL, etc.) et en suivant le modèle de référence proposé dans la matrice des propriétés.
- Manipuler les propriétés obtenues ce qui suppose, entre autre, de rester indépendant des formalismes de modélisation de systèmes utilisés, de pouvoir réutiliser ou partager des connaissances acquises lors d'études antérieures, etc.
- Garantir, supporter et donner accès à des mécanismes de raisonnement à divers niveaux d'abstraction et de détail de modélisation et, éventuellement, pouvoir utiliser des formalismes de preuve appropriés pour un problème particulier.
- Permettre à un acteur de saisir l'ensemble de la connaissance dont il a besoin ou dont il est le dépositaire sans pour autant nécessiter des compétences particulières de modélisation.
- Pouvoir enrichir le panel de concepts de représentation comme d'aide à la preuve, à l'estimation et à l'évaluation de propriétés sans pour autant remettre en cause l'existant (compatibilité avec des versions d'études antérieures).

L'étude d'approches utilisées pour concevoir certains langages comme PSL [Schlenoff et al, 97,96], de GOGITO [Hart et al. 1996] ainsi que certains travaux méthodologiques autour des ontologies [Gruninger 1996, Uschold et al. 1996, Gruber 1993], ont permis de définir une démarche itérative, hiérarchisée et descendante en 5 étapes schématisées dans la Figure 31. Cette approche permet de rompre avec la complexité de la réalisation en procédant par affinements successifs des concepts.

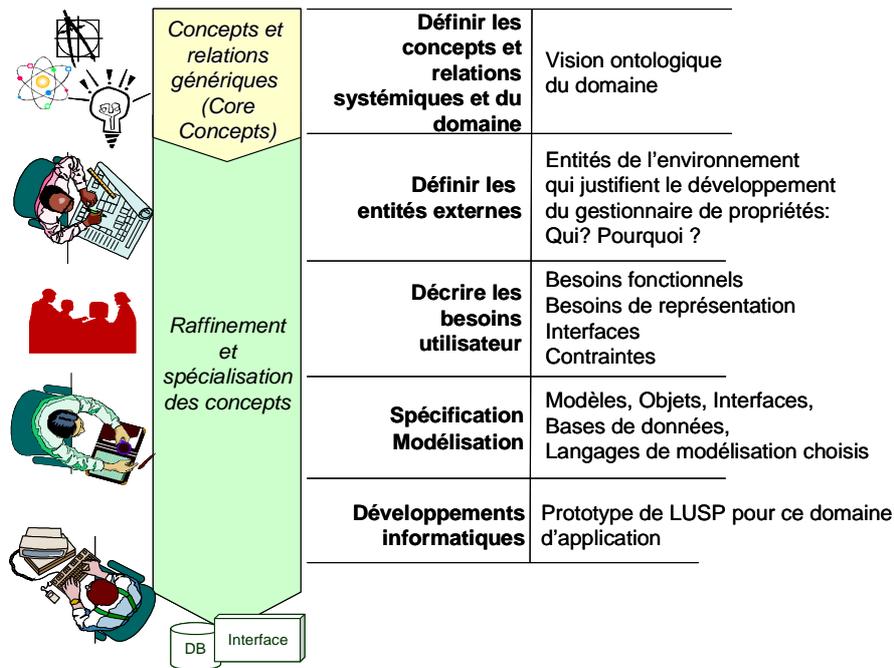


Figure 31 : Démarche de développement

Cette démarche permet de formaliser LUSP sous forme de 5 couches concentriques schématisées dans la Figure 32. Les concepts et les relations de chaque couche sont un enrichissement des concepts et des relations de la couche immédiatement inférieure.

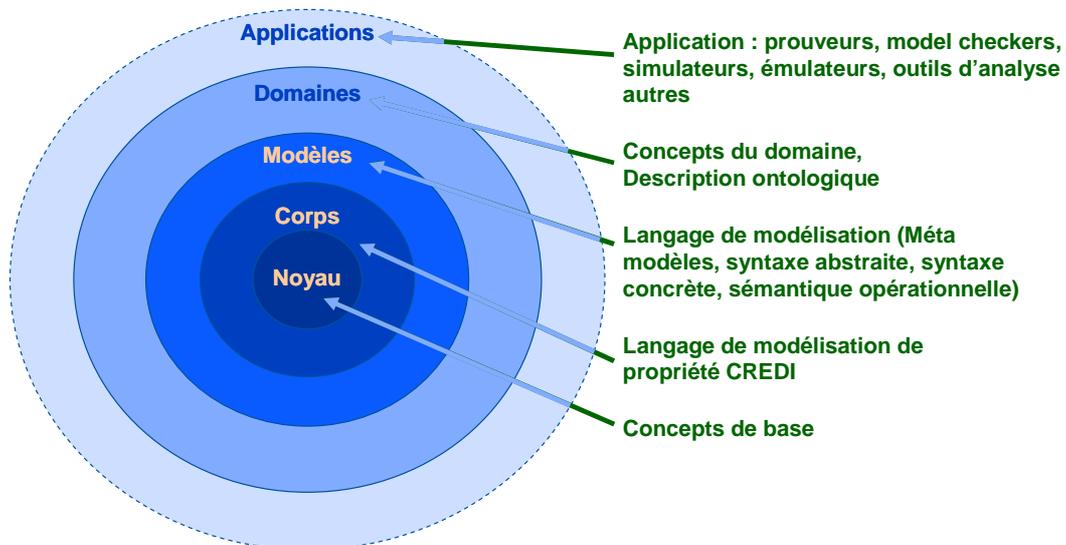


Figure 32 : Les 5 couches concentriques de LUSP

Ce sont :

- La couche **Noyau** implémente les concepts de base (Ensembles, Temps, Graphes, Concepts de systématique) ainsi que les opérateurs et les opérations classiques qui y sont associés (addition, union, implication, intervalle, etc.).
- La couche **Corps** implémente le modèle de propriété. Elle contient toutes les notions de Référent, Granularité, ensembles causes, ensembles effets, relation de causalité, véracité et valeur de propriété, faits, etc. et les associations entre ces concepts et permet ainsi à l'utilisateur de formuler les propriétés à prouver ou à évaluer.

- La couche **Modèles** implémente les différents constructs et règles sémantiques associés aux langages ou formalismes susceptibles d'être utilisés par le modelleur : Grille GRAI, Grafcet, Réseaux de Petri, etc. ainsi que les méta modèles possibles permettant de passer d'un formalisme à un autre selon une approche qui est aujourd'hui reconnue comme celle proposée par le MDA [MDA 2001]. La Figure 33 montre un exemple d'enrichissement proposé à l'époque. Ces principes d'enrichissement évoquent tout à fait ceux préconisés depuis par l'approche MDA.

- La couche **Domaine** implémente les concepts et méthodes liés aux domaines d'expertise : systèmes de production, systèmes temps réel, sûreté de fonctionnement des systèmes, etc. L'objectif est alors, en fonction de la vue adoptée, d'enrichir les concepts contenus dans les couches Corps et Modèles précisant la sémantique liée au domaine d'étude.

- La couche **Applications** contient les différentes instances du modèle sur lequel l'évaluation ou la preuve doivent être effectuées comme indiqué dans la figure suivante. Ainsi, LUSP permet d'assurer une interface entre un outil de modélisation quelconque et un outil d'analyse du marché comme un model-checker, un theorem-prover, un simulateur ou autre.

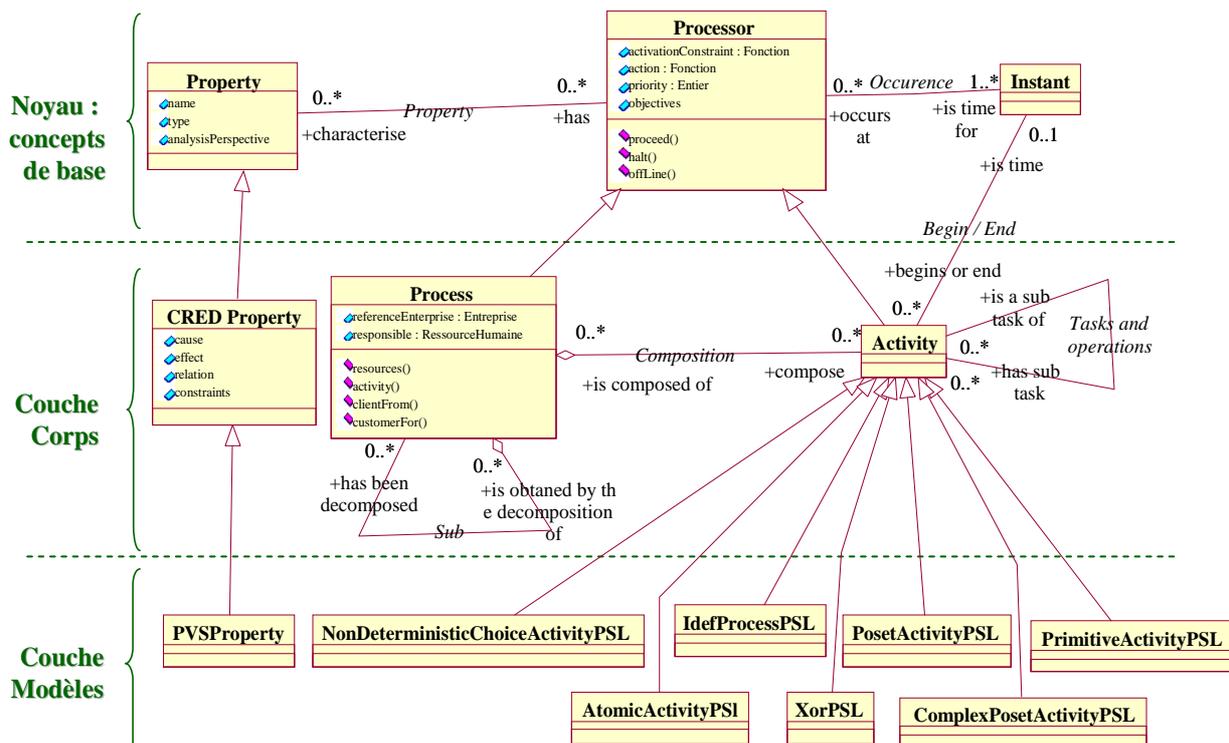


Figure 33 : Exemple d'enrichissement (vue partielle)

Cette thèse a fait l'objet de quatre articles dans des conférences internationales (CI14, CI16, CI17, CI18) et de présentations dans diverses instances académiques et industrielles (PT8, PT9, PT10, PT11).

Afin de soutenir le travail de recherche d'E.Lamine et de tester les hypothèses d'applicabilité du modèle de propriété, j'ai encadré durant cette période le DEA de X.Olive (DEA6 avec un taux d'encadrement de 50%). Son travail a consisté à élaborer un modèle formel du concept de propriété tel que proposé au cours de la thèse T1, modèle que nous souhaitons pouvoir employer pour décrire des propriétés à vérifier sur un ensemble de MSI interconnectées. La

méthode Z a été employée pour formaliser le concept de propriété dans cette notation ensembliste et pour bâtir ainsi la base du langage LUSP. Cette formalisation a fait, entre autres, l'objet d'une présentation dans le cadre du GRP (PT8).

## 5 - VALIDATION : SEMANTIQUE OPERATIONNELLE ET SIMULATION

### a - Problématique

Comme vu plus haut, la simulation reste une technique appréciée en modélisation d'entreprise. Cependant, quelle sémantique opérationnelle unique et formelle utiliser pour exécuter un modèle ?

- **Unicité** : à titre d'exemple, on ne recense pas moins de 72 sémantiques opérationnelles différentes pour le seul modèle des State Charts de Harel [Harel 1987, Maggiolo-Schettini et al. 1996]. Toutes ces sémantiques sont valides, utilisables et justifiables voire implémentées dans des outils comme Statemate, mais laquelle utiliser réellement, comment justifier cet usage ou dans quels cas de simulation du modèle ?

- **Niveau de formalisation** : Les langages de modélisation d'entreprise ne peuvent et, quelquefois, ne doivent pas être d'un niveau de formalisation élevé pour toutes les raisons vues plus haut. Comment alors être confiant dans l'exécution d'un modèle qui ne soit pas suffisamment formel ? Un autre parallèle possible peut être fait avec le Grafcet. Il existe 5 règles classiques d'évolution plus une règle d'évolution prenant en compte le forçage. Ces règles sont strictes et peuvent être formellement définies. Qu'en est-il par contre d'un langage de modélisation comme MOV ?

### b - Contribution

J'ai, en parallèle avec le début de thèse d'E.Lamine, continué le travail de recherche entrepris sur la sémantique opérationnelle du langage de modélisation MOV et la prise en compte de cette sémantique opérationnelle pendant la phase de vérification de propriétés comportementale sur un ensemble de MSI interconnectées. C'est ce dernier travail qui est à l'origine du DEA de D.Pladeau (DEA5 avec un taux d'encadrement de 50%) qui a consisté à formaliser cette sémantique opérationnelle en se basant sur le modèle PMO (Produit, Machine, Opérateur) proposé par Rodde<sup>22</sup> [Rodde 1989] et schématisé Figure 34.

Ce DEA s'est consacré à la formalisation des règles de réécriture d'une instance d'un modèle MOV de processus de production vers un ensemble de MSI interconnectées afin d'obtenir un modèle de comportement de ce processus. Les MSI obtenues peuvent être simulées ou vérifiées au moyen des mécanismes de preuve basés sur la logique temporelle développés durant la période post doctorale.

J'ai ensuite généralisé ces règles de traduction pour proposer, en se basant sur le langage de modélisation MSI Synchrone, une sémantique opérationnelle unifiante pour certains langages de modélisation existant du domaine de la modélisation d'entreprise. Ainsi, nombre d'outils de

---

<sup>22</sup> Le comportement d'une entité impactant la valeur ajoutée d'une activité se décrit sous la forme d'un modèle à état : 5 états par défaut et les transitions entre ces états décrivent les conditions d'évolution de l'entité. Le modèle est formellement décrit et est donc vérifiable au moyen d'outils existants de type model checkers.

model checking du marché deviennent utilisables pour prouver des propriétés sur les modèles de processus tels que ceux inspirés en particulier de l'approche CIMOSA. Cette sémantique opérationnelle a fait l'objet d'une publication dans une conférence internationale CI20.

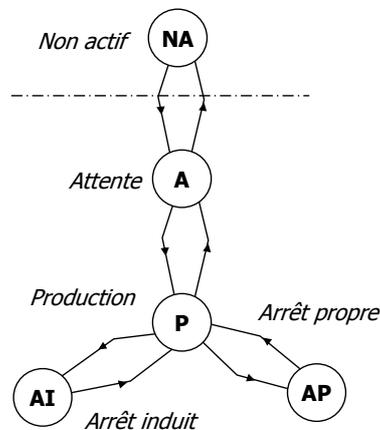


Figure 34 : Modèle PMO [Rodde 1989]

## 6 - MODELISATION : LE REFERENTIEL DE PROPRIETES

Le langage LUSP propose un cadre de modélisation formelle d'une propriété. Une propriété peut ainsi être considérée comme une connaissance supplémentaire dont le modelleur peut disposer pour :

- compléter l'information qu'il décrit dans son modèle de l'entreprise : le modèle de l'entreprise est enrichi par la spécification de propriétés caractérisant l'environnement de ce système.
- pour vérifier le modèle c'est-à-dire pour améliorer la cohérence et la consistance du modèle
- pour valider la pertinence du modèle : la propriété décrivant des faits extérieurs au modèle devient alors un outil de validation partiel du modèle.

La recherche a alors consisté à développer LUSP pour tenter de répondre à deux constats :

- La spécification des propriétés reste une tâche éminemment ardue et dédiée à des personnes rompues aux techniques de modélisation formelle. Comment alors aider le modelleur durant cette tâche de spécification ?
- Les outils de preuve de propriétés sont généralement orientés vers de la preuve de propriétés essentiellement fonctionnelles et utilisent des modèles à états, tels que la MSI Synchronique, dont l'utilisation en modélisation d'entreprise reste assez limitée. Comment vérifier par preuve de propriétés des modèles établis en utilisant d'autres concepts que celui d'état et de transition et d'autres langages de modélisation ? Quels outils de preuve utiliser alors ? Quels outils utiliser si l'on est confronté à plusieurs modèles simultanément utilisant chacun un langage différent pour décrire des vues complémentaires d'un même système ?

C'est cette double situation que j'ai souhaité étudier dans le cadre de la thèse de B.Kamsu-Foguem (T2 avec un taux d'encadrement de 80%). Elle a consisté d'abord à formaliser un

référentiel de propriétés, puis à développer un outil de preuve basé sur les Graphes Conceptuels.

### a - Problématique

[Jackson 1995] définit un lien entre les propriétés d'un domaine, les besoins d'un utilisateur et le modèle du système demandé. Une interprétation rapide de ces liens est la suivante :

- **Les propriétés d'un domaine d'application** comme la modélisation d'entreprise mais aussi l'ingénierie du logiciel ou l'ingénierie système, forment l'ensemble des connaissances axiomatiques dont on dispose pour décrire ce domaine. Elles sont donc supposées toujours devoir être vérifiées par le modèle, indépendamment de l'existence même du système auquel correspond ce modèle. Le modelleur devra alors utiliser et prendre en compte ces propriétés durant la phase d'analyse.

- **Les besoins de l'utilisateur** sont exprimés sous forme d'un ensemble de propriétés qui utilisent dans leur formulation des concepts du domaine d'application choisi. Ces propriétés enrichissent la connaissance axiomatique déjà acquise avec la prise en compte du domaine mais le modelleur souhaite que le système futur vérifie bien ces propriétés.

- **Les spécifications** sont faites au travers des modèles du système décrit (AS-IS) ou souhaité (TO BE et Implémentation) qui en décrivent la structure, le comportement et/ou les fonctions. Le modèle doit donc bien vérifier que les besoins sont couverts, qu'il se conforme à la connaissance axiomatique et, enfin, que chaque modèle respecte enfin des propriétés propres au langage de modélisation employé.

On voit alors apparaître différents types de propriétés selon leur cible qui doivent toutes être vérifiables par le modèle.

En effet, [Easterbrook 02] formule la phase d'ingénierie d'un modèle comme la recherche d'un modèle qui implicitement respecte les propriétés du domaine et respecte aussi l'ensemble des besoins exprimés:

$$\text{Propriétés du Domaine} \wedge \text{Spécifications} \Rightarrow \text{Besoins Exprimés} ?$$

On peut alors faire plusieurs remarques. Tout d'abord, la vérification du modèle, si elle se veut formelle, nécessite d'exprimer les besoins et les propriétés du domaine au moyen d'un langage formel unique. Il faut ensuite que ce langage formel ou, à défaut, que le (ou les) langage(s) de modélisation choisi(s) pour bâtir le modèle, soient compatibles entre eux, c'est-à-dire puissent être utilisés conjointement dans le processus de vérification. La validation du modèle nécessite ensuite de s'assurer que le système réalise de manière 'suffisamment correcte' la totalité des fonctions attendues et fonctionne de manière satisfaisante dans les diverses configurations et situations qui ont été spécifiées.

Dans la pratique, cette démarche de définition des propriétés traduisant la connaissance du domaine, des besoins et des contraintes reste relativement malaisée et connaît souvent des échecs pour plusieurs raisons :

- Les besoins sont mal exprimés à cause d'une insuffisante communication entre acteurs, d'un manque d'analyse, ou encore de la méconnaissance de l'évolution d'une situation.

Une nouvelle concertation entre les acteurs, une nouvelle modélisation et une validation formelle peuvent pallier ces lacunes.

- La spécification est erronée suite à une mauvaise compréhension des besoins, à un mauvais choix du langage de spécification (voir pour cela l'effort notable en la matière concernant une possible classification de propriétés déjà écrites selon plusieurs logiques et langages dédiés [Dwyer et al. 1999]), à une ambiguïté ou à une incomplétude de la spécification. On peut y remédier par une vérification formelle ou par des tests récursifs.
- Les propriétés du domaine restent discutables car il y a une absence d'expertise approfondie et l'investigation du domaine peut toujours être qualifiée d'approximative. Ainsi une prise en compte des documents spécialisés et l'avis des experts s'imposent.

### **b - Contribution**

La thèse de B.Kamsu-Foguem a ainsi débuté par la formalisation d'un référentiel de propriétés [Kamsu 2004] destiné à améliorer de manière significative la phase de spécification des modèles d'entreprise par la proposition d'un ensemble de propriétés types. En substance, l'objectif de ce référentiel de propriétés est de :

- Fournir une modélisation systémique et explicite des propriétés usuelles mais déterminantes d'une entreprise et de son environnement.
- Faciliter leur accès, partage et réutilisation par les membres de l'entreprise dans leurs tâches individuelles et collectives.
- Constituer une valeur ajoutée pour des processus organisationnels et de production, notamment en favorisant la mise à jour et la création de nouvelles propriétés pertinentes pour l'entreprise et/ou pour l'objectif de modélisation choisi.
- Garantir un ensemble d'éléments concourant à la mise en œuvre des spécifications appropriées et exhaustives pour un problème particulier.

Le référentiel de propriétés est ainsi une sorte de base de données permettant d'accéder, de manipuler et d'interpréter une connaissance supplémentaire qui ne peut être représentée dans le seul modèle analysé, d'instancier ou d'interpréter les propriétés à sa disposition puis de les paramétrer en tenant compte des éléments présents dans le modèle : attributs, états, etc.

L'architecture de ce référentiel a été choisie pour offrir une vision structurée des propriétés et en prenant en compte les différentes vues et les niveaux de détails au travers duquel le système est perçu. Toutes ces connaissances sont formalisées au moyen de l'unique langage de modélisation LUSP. Ce référentiel constitue donc un véritable guide de spécification des propriétés des systèmes dans l'entreprise.

Il se schématise sous forme du cube donné Figure 35 dont chacun des axes x, y et z décrit un point de vue de la deuxième classification de propriétés proposée au cours de cette recherche.

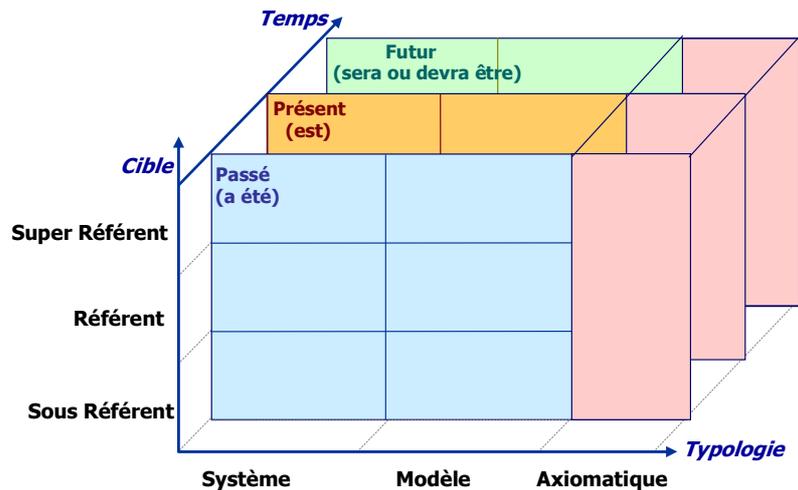


Figure 35 : Le référentiel de propriétés : 2<sup>ème</sup> classification proposée

Le premier axe, appelé **Typologie**, permet de classer les propriétés en fonction du type d'objet qui est caractérisé par ces propriétés (ce qui induit alors des nécessités et/ou des possibilités de vérification – preuve formelle, simulation, émulation ou simple expertise - différentes). Ce point de vue met ainsi en avant trois types de cible :

- **Axiomatique** : ces propriétés traduisent chaque axiome de la connaissance de base que le modéleur pourra utiliser dans un domaine donné. Ce sont donc des propriétés pouvant être prouvées pour vérifier la pertinence du modèle (but de validation) mais pouvant aussi être considérées comme toujours vraies auquel cas elles peuvent être prises en compte pour spécifier et prouver ensuite d'autres propriétés. Dans ce cas, elles ne peuvent en effet pas être remises en cause car elles modélisent des faits indiscutables comme des lois de la nature (équations de Maxwell, les lois de la pesanteur, etc.), des normes ou des standards de fait.

Ce peut être aussi des propriétés choisies par l'utilisateur parmi les trois autres types de cette classification pour modéliser une connaissance particulière qu'il considère comme un axiome de base qu'il désire utiliser et prendre en compte sans remise en cause.

Elles peuvent être dites 'abstraites' ou 'concrètes' selon leur niveau de généralité. Le niveau abstrait considère la propriété comme caractérisant une partie d'un système de manière indépendante de tout champ d'application et systémique. Le niveau concret considère pour sa part des propriétés dépendantes de champs ou de domaines d'application particuliers. On peut citer par exemple les propriétés liées aux attributs de temps, d'espace et de forme qui permettent de caractériser les processus de transformation de matières et/ou d'énergie relativement à leurs flux entrants et sortants [Feliot 1997].

- **Système** : ce sont des propriétés permettant de caractériser le système vis-à-vis de son environnement et de caractériser les contraintes auxquelles ce système est soumis.

Ce sont donc des propriétés qui permettent de décrire et de lier entre eux la mission, les objectifs, les besoins et la ou les finalités du système visé. Elles permettent ensuite de décrire les contraintes de déploiement, géographiques, architecturales, de fonctionnement, de sûreté de fonctionnement, de confidentialité, de maintenabilité, environnementales, de volumétrie, de performance, de disponibilité, d'accessibilité, d'utilisabilité, etc.

Par exemple, si le référent est le modèle d'un processus opérationnel tel qu'un processus d'assemblage (existant ou non), ce sont des propriétés exprimant les contraintes et exigences fonctionnelles ou non fonctionnelles auxquelles le processus est (ou sera) soumis et les objectifs qui lui sont fixés. Ce sont alors des propriétés de fonctionnement (temporelles ou atemporelles), de sûreté de fonctionnement, environnementales, de performance (par exemple productivité, disponibilité), etc.

Ces propriétés dérivent une connaissance abstraite et souvent exprimable seulement en langage naturel. Elles ne peuvent évidemment être utilisées directement. Elles seront prouvées ou évaluées après traduction sous la forme de propriétés de type Modèle. Cela nécessite de définir une sémantique suffisamment forte et précise pour éviter pertes, ambiguïtés et interprétations parasites.

- **Modèle** : ce sont les propriétés de vivacité, de complétude, de cohérence, de réinitialisabilité, liées à la mise en évidence d'un parallélisme, d'une synchronisation ou d'une séquence, d'un bornage, de la présence de cycles dans l'exécution d'un modèle, de blocage temporaire ou définitif, etc. Elles doivent permettre, par preuve formelle :

- de rassurer l'utilisateur en termes d'adéquation du modèle établi avec le processus réel en fonction d'un point de vue donné,
- d'assurer que le modèle établi respecte bien les règles syntaxiques et sémantiques imposées par le formalisme de modélisation employé et le domaine,
- de vérifier enfin les propriétés issues de la traduction des propriétés de type Système.

Les Figure 38, Figure 36 et Figure 37 montrent des extraits du référentiel de propriétés : la formulation en est ici en langage naturel pour en simplifier la lecture.

Le deuxième axe, appelée **Cible**, précise quel sera l'objet de l'étude et permet de positionner cet objet (le référent) vis-à-vis de son environnement (le super référent) ou de ses composants (les sous référents):

- Le **référent** est l'objet de l'étude.
- Le **super référent** est un référent du même type (système englobant, environnement ou modèle ayant été établi en utilisant le même langage de modélisation) que le référent étudié et dont ce référent peut-être un composant, une partie qui entretient une relation de décomposition ou d'analogie particulière avec lui. A chaque point de vue peut ainsi correspondre un super référent donné différent. Par exemple, pour un référent de type modèle comportemental d'une activité, on peut considérer aussi bien le super référent composé de l'ensemble des acteurs impliqués dans cette activité que le processus dont cette activité fait partie.
- Les **sous référents** sont eux aussi du même type que le référent mais sont considérés à leur tour comme des entités :
  - composants ou constituants dont l'interconnexion forme le référent (structurel)
  - dont la somme des comportements est équivalente au comportement du référent (comportemental)

- en interaction au sein du référent pour atteindre sa finalité. Ici aussi, en fonction du point de vue, il peut être nécessaire de décrire plusieurs sous référents possibles.

Cet axe peut être décliné pour permettre de représenter, en parallèle du référent lui-même, l'anti-référent qui y correspond et permettre d'ouvrir ainsi considérablement le champ exploratoire des propriétés. L'anti-référent est inspiré de la notion d'anti-système proposé par [Mann 2002] : il se définit comme le contraire exact du référent selon un point de vue donné.

Enfin, l'axe **Temps** détermine à quel moment la propriété caractérise réellement la cible.

- **Passé** : ce que le référent faisait, pouvait faire, a su faire et faisait effectivement.
- **Présent** : ce que le référent doit faire, peut faire, sait faire ou fait actuellement.
- **Futur** : ce que le référent devra faire, pourra faire, saura faire ou fera.

Le but est de pouvoir décrire l'évolution de la connaissance que l'on a d'un référent car « *un système qui fonctionne est un système qui évolue* » et des trajectoires d'évolution possible de ce référent.

<i>Structurel</i>	Activité primitive	Les activités primitives qui sont le résultat d'une décomposition d'une activité peuvent être partiellement ordonnées
	décomposition activité primitive	Une activité primitive (tâche ou opération) ne peut être décomposée
	décomposition activité	Une activité peut se décomposer sous forme d'activités primitives (c'est à dire de tâches ou d'opérations de bas niveau)
	entrée/sortie	Chaque activité doit posséder au moins un flux d'entrée et un flux de sortie
	ressource minimale	Chaque activité doit posséder au moins une ressource
<i>Comportemental</i>	Occurrence d'activité	Si une occurrence d'activité (autre que non déterministe, exclusive ou IdeF) survient à l'instant t et que cette activité est décomposée en sous-activités alors il existe une occurrence en t de l'une au moins de ces sous-activités (toujours les mêmes). Ce schéma d'exécution est bien entendu le même pour chacune de ces sous-activités
	Occurrence d'activité non déterministe	Si une occurrence d'activité non déterministe survient à l'instant t et que cette activité est décomposée en sous-activités alors il existe une occurrence en t d'une ou plusieurs de ces sous-activités éventuellement chaque fois différente
	Occurrence d'activité IdeF	Si une occurrence d'activité IdeF survient à l'instant t et que cette activité est décomposée en sous-activités alors chacune de ces sous-activités peuvent démarrer dans n'importe quel ordre
	Occurrence d'activité exclusive	Si une occurrence d'activité exclusive survient à l'instant t et que cette activité est décomposée en sous-activités alors il existe une occurrence en t de l'une et d'une seule de ces sous-activités

Figure 36 : Extrait du référentiel : propriétés modèle

Pression	$PV=nRT$
Base électronique	$U=RI$
calcul de durée	$durée(activité)=endof(activité)-beginof(activité)$

Figure 37 : Extrait du référentiel : propriétés axiomatiques

Mission 1	Tout processeur satisfait à une mission (exemple : riveter des pièces ou extraire des données)
Mission 2	Tout objet peut jouer plusieurs rôles selon la situation dans laquelle on le représente (il peut être ressource support dans un processus et entrée d'une activité de maintenance par exemple)
Mission 3	Toute sortie d'un processeur est soit intentionnel (car répondant à l'objectif ou la mission fixée à un processeur) soit non intentionnel (car résultant de l'activité propre du processeur : polluant, nuisance, rejet, rebut, sortie indésirable, etc.)
Mission 4	Les entrées d'un processeur peuvent être de type tangible (matière, produit, énergie) ou intangible (données, information, connaissances)
Domaine opérationnel entrée/sortie	A chaque entrée d'une activité (de transformation de flux) appartenant à un domaine opérationnel de type matière doit correspondre une ou plusieurs sorties des domaines opérationnels matière ou énergie
Ressources 1	La réalisation d'une activité s'effectue à l'aide de ressources (humaines ou technologiques - matérielles ou logicielles) et dans le cadre d'objectifs et de contraintes clairement identifiées
Ressources 2	Les ressources matérielles qui supportent une activité nécessitent un flux d'entrée du domaine opérationnel énergie
Ressources 3	Une activité nécessitant la présence et l'action d'une ressource humaine nécessite des profils (de compétences, de connaissances, de savoir-faire et de savoir-être) de la part de cette (ces) ressource(s) humaine(s)

Figure 38 : Extrait du référentiel : propriétés système

Cette classification est mise en œuvre dans la Figure 39 dans le cas du contrôle commande d'un système de pompage. Cette figure ne met pas en avant les propriétés axiomatiques du domaine concerné et se base sur un seul plan temporel. La granularité choisie ici est liée aux règles de décomposition du langage de modélisation employé.

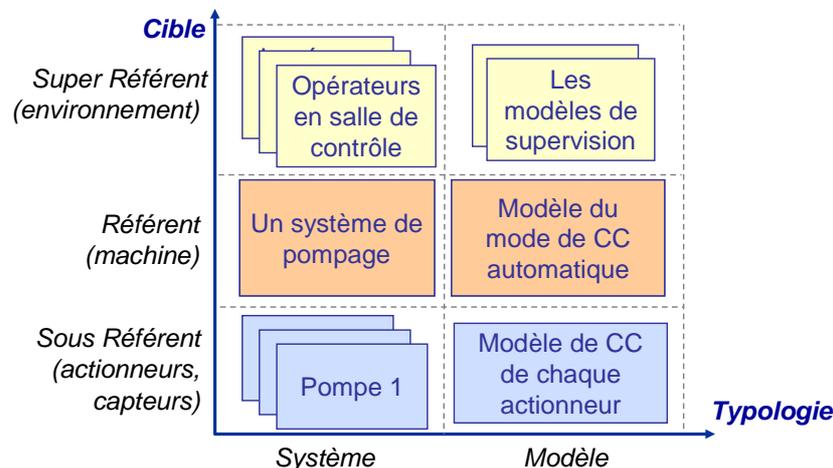


Figure 39 : Exemple dans un domaine connexe de la modélisation d'entreprise

Le processus d'utilisation du référentiel est basé sur le choix du modelleur pour soit créer de toutes pièces de nouvelles propriétés propres à son projet, soit faire appel aux propriétés du référentiel à titre d'aide à la spécification. Il pourra alors créer de nouvelles propriétés en manipulant et associant entre elles des propriétés existantes dans le référentiel en :

- Les instanciant puis les paramétrant en tenant compte du référent choisi et de la finalité de l'étude choisie (lors de la traduction du référent).

- Les paramétrant en tenant compte du référent choisi et de la finalité de l'étude choisie (par un choix judicieux des faits pertinents après la traduction du référent).
- Les interprétant pour en tirer une propriété locale applicable au référent (par recherche et sélection de faits pertinents après traduction du référent).

Compte tenu des ressources limitées en recherche et développement dont disposait l'équipe, il ne pouvait être envisagé d'investir dans le développement ou l'adaptation de model checkers ou même de theorem provers existants pour la preuve de propriétés décrites en LUSP.

La deuxième partie de la thèse s'est donc consacrée à la formalisation et à la mise en œuvre d'un outil de vérification respectant un certain nombre de contraintes.

## 7 - VERIFICATION : LES GRAPHES CONCEPTUELS

### a - Problématique

Comme vu plus haut, il existe nombre d'outils formels de preuve. Cependant, le domaine d'application choisi et les différentes contraintes détaillées plus haut, liées à l'usage même d'outils de vérification par preuve formelle, ne permettent pas un usage de ces outils et techniques sans un effort considérable d'adaptation.

Il est donc nécessaire de trouver une sorte de compromis entre une vérification complètement formelle, basée sur ces outils formels et reconnus de la communauté, et une vérification ou une validation ad hoc qui s'autorise une certaine latitude dans la rigueur de la preuve pour mettre en avant d'autres qualités synthétisées dans la Figure 40. L'application des Graphes Conceptuels à notre problématique de vérification et de validation partielle est la réponse que nous apportons à ce compromis.

### b - Contribution

Les langages formels conceptuels tels Telos [Mylopoulos et al. 1990], Albert II [Dubois et al. 1998], les Graphes Conceptuels [Sowa 1984], les langages dédiés à la description d'ontologies tels KIF (Knowledge Interchange Format) [KIF 1998] ou plus récemment OWL [OWL 2004] pour le web sémantique (voir [Swoogle 2006]) offrent plusieurs qualités :

- **Expressivité et lisibilité** : grâce à la formalisation du vocabulaire pour décrire un domaine.
- **Précision et rigueur** : grâce à de nombreux mécanismes permettant de vérifier la cohérence des connaissances.
- **Raisonnement** : Ils disposent des mécanismes d'inférence basés ordinairement sur des logiques du premier ordre, voire offrent même des possibilités de traduction de manière isomorphe vers ces logiques, autorisant ainsi l'usage d'autres mécanismes de raisonnement.

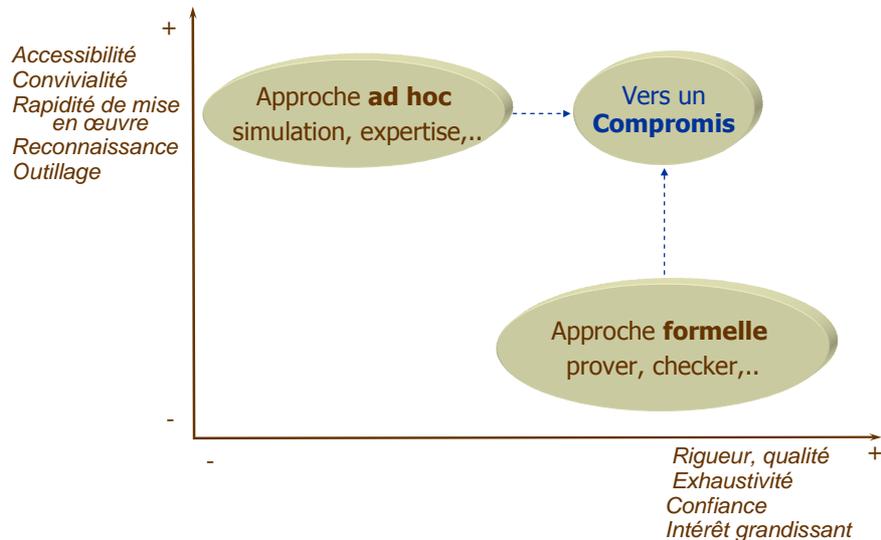


Figure 40 : Problématique de la vérification vue comme un nécessaire compromis

Pour répondre à notre besoin de représentation et de manipulation de connaissances, nous avons choisi le formalisme des Graphes Conceptuels [Chein et al. 1992] pour plusieurs raisons.

C'est d'abord un langage de représentation de connaissances inspiré des réseaux sémantiques de [Quillian 1968] qui possède une forme graphique pratique à manipuler.

Ensuite, les Graphes Conceptuels permettent de représenter de manière rigoureuse et lisible la connaissance sous la forme de graphes alternant des nœuds représentant les concepts et de liens représentant les relations utilisées dans les langages de modélisation visés.

Les Graphes Conceptuels possèdent enfin un fondement mathématique relativement plus abouti bien que moins outillé d'un point de vue pratique que la majorité de leurs concurrents. En effet, des mécanismes formels de projection, des principes de règles et de contraintes permettent de s'assurer de la véracité ou plus simplement de la simple présence d'une connaissance donnée dans un graphe.

Le travail a consisté à définir comment traduire un modèle d'entreprise dans un graphe unique. Ensuite, chaque propriété est traduite dans un graphe propre manipulé au moyen des mécanismes proposés : projection, règle ou contrainte. Si par exemple une projection échoue, la propriété n'est pas vérifiée et l'attention, voire l'interprétation du modelleur, doivent se focaliser sur cette propriété. Enfin, l'ensemble des propriétés spécifiées par le modelleur peut être traduites dans un graphe unique afin de vérifier la cohérence et la consistance des propriétés au moyen des mêmes mécanismes (projection et contrainte).

La contribution globale de ce travail de thèse est donc :

- **Un référentiel de propriétés** qui facilite la spécification de propriétés génériques et spécialisées.
- **Un vocabulaire précis du domaine de la modélisation d'entreprise** dont le processus d'extraction et de formalisation est décrit dans la Figure 41.

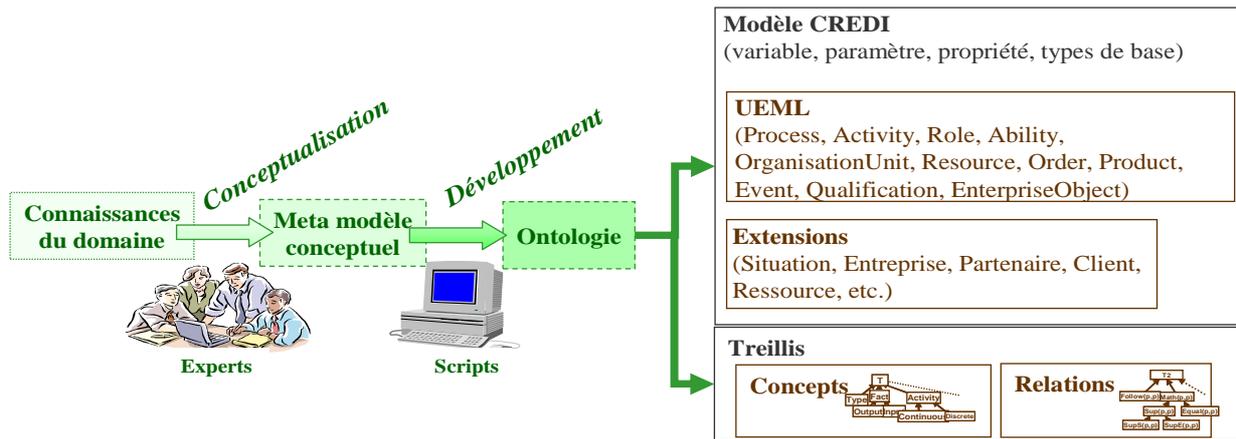


Figure 41 : Processus de formalisation des concepts et des relations

Ce vocabulaire est décrit tout d'abord sous la forme d'un méta modèle UML regroupant les concepts et les relations entre concepts de la modélisation d'entreprise considérés comme pertinents (activité, entreprise, unité d'organisation, processus, flux, compétence, etc.) et mis en œuvre dans des langages de modélisation.

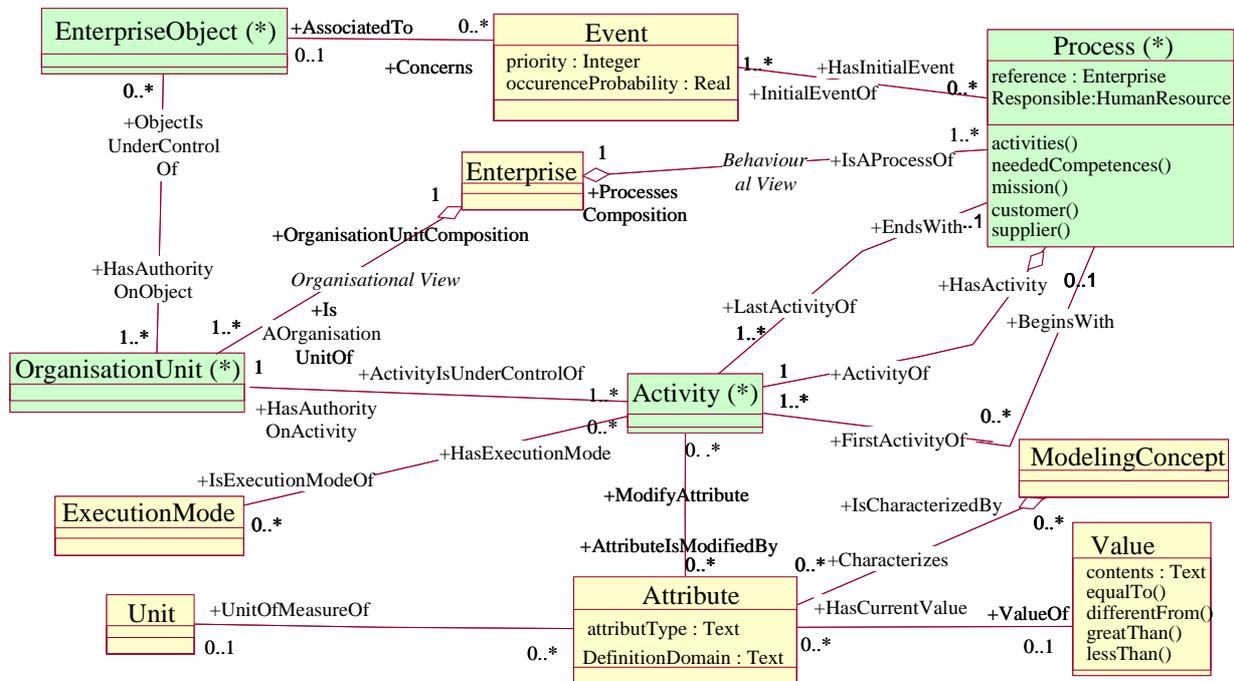


Figure 42 : Extension du méta modèle proposé pour UEML (vue partielle, les extensions proposées sont précédées d'une \*)

Le problème est alors le risque d'homonymie ou d'interprétation différente du même concept entre différents langages de modélisation. Comme dit plus haut, le projet UEML a tenté de résoudre ces problèmes d'interopérabilité des langages et proposé un méta modèle des concepts et relations nécessaires. Pour doter cette première version de UEML de mécanismes de preuve, nous avons donc étendu ce méta modèle comme indiqué dans la Figure 42 et proposé cette extension et le mécanisme de vérification associé dans (RI2).

Ce méta modèle est ensuite traduit suivant les règles de réécriture proposées dans la Figure 43 dans deux treillis respectivement dits 'treillis des concepts' décrivant la hiérarchie des concepts et 'treillis des relations' décrivant les relations entre ces concepts.

Diagramme de classe (UML)	Treillis
Classe	Concept
Héritage	Hiérarchie des concepts
Encapsulation	Nested graphs
Méthode	Relation
Relation	Relation (role 1 et role 2)
Attribut	Relation

Figure 43 : Règles de traduction de Diagrammes de classe UML vers les Graphes Conceptuels

Un exemple très simple de cette traduction est donné dans la Figure 44.

- **La formalisation d'un processus de traduction** sans perte de la structure et de la sémantique d'un modèle, quel que soit le langage actuellement proposé, dans le langage des graphes conceptuels permet de le rendre ainsi analysable.
- **La possibilité de vérifier des propriétés** sur des modèles d'entreprise, et de disposer d'une certaine traçabilité des raisonnements qui facilite la mise en évidence des défauts et l'amélioration des modèles
- **Un outillage partiel** de la démarche globale illustrée par la Figure 45.

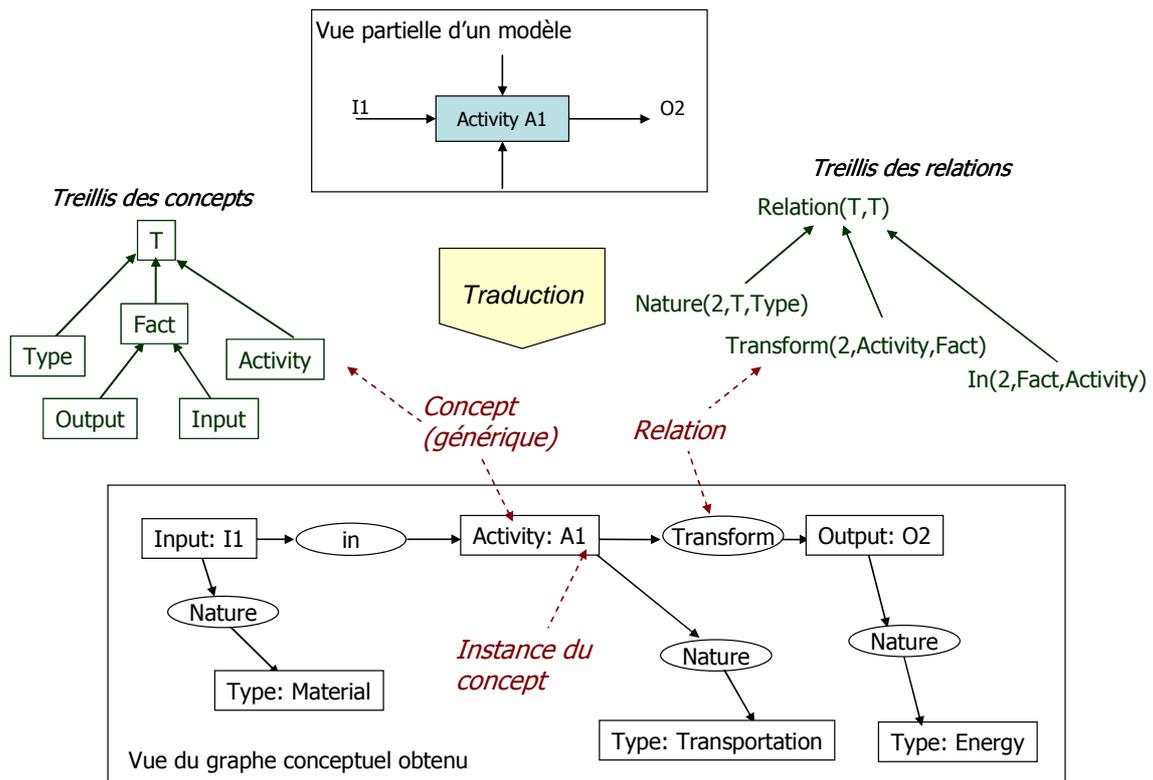


Figure 44 : Exemple de mise en œuvre des treillis dans la traduction d'un modèle (vue partielle)

Cette approche de preuve ne permet évidemment pas de prouver des propriétés dites temporelles c'est à dire des propriétés dans lesquelles le temps intervient explicitement. C'est aujourd'hui une des perspectives de recherche qui sont présentées plus loin.

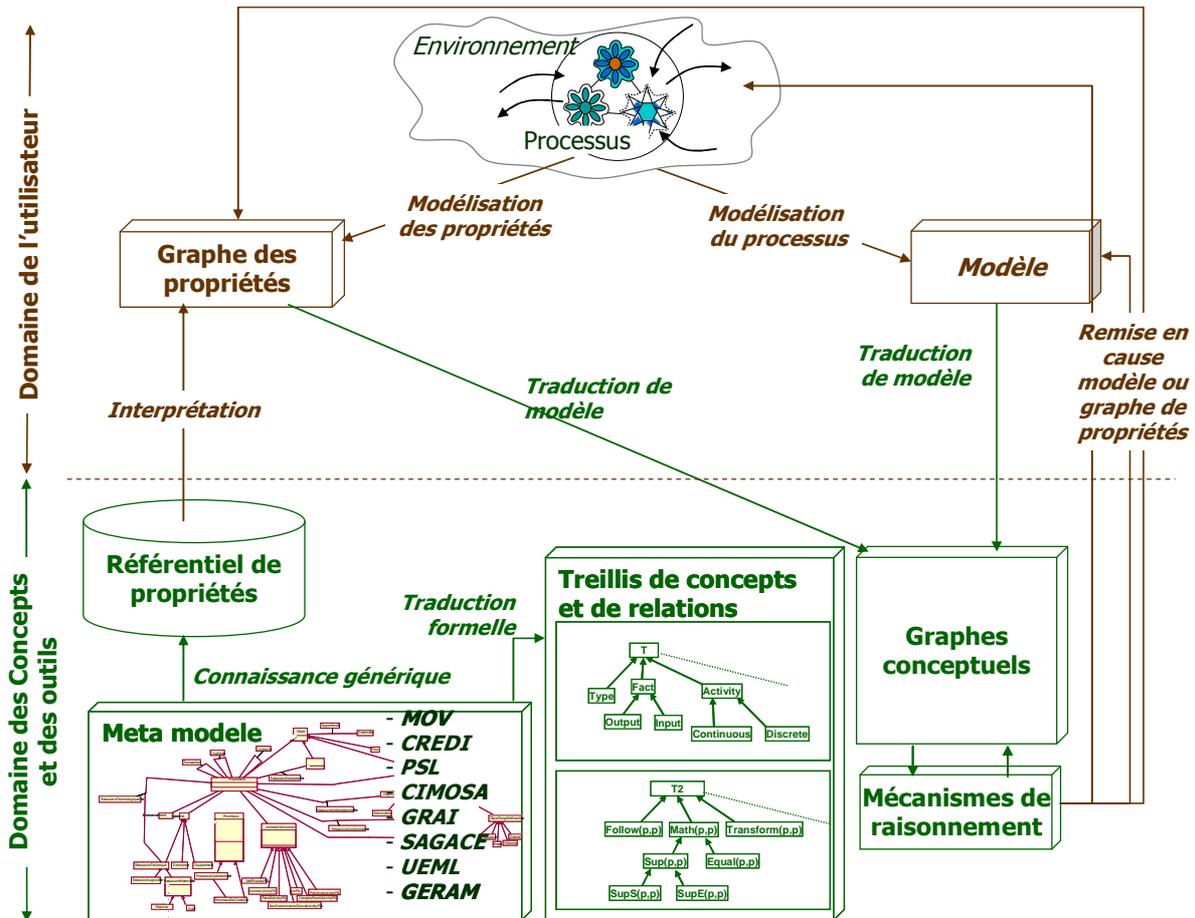


Figure 45 : processus de preuve au moyen des graphes conceptuels

Cette phase de recherche a fait l'objet de trois revues internationales (RI1, RI2, RI3), d'une revue nationale (RN2), de cinq articles dans des conférences internationales (CI9, CI10, CI11, CI12, CI13) et d'une présentation (PT5).

## 8 - APPLICATION : USAGE DE LA V&V DANS UNE APPROCHE DU RISQUE

Le management du risque (technique, humain, financier, social, stratégique, etc.) est une nécessité durant le pilotage de tout ou partie de l'entreprise. Il se définit, selon le groupe de travail Enterprise Risk Management (ERM), comme *'the discipline by which an organization in any industry assesses, controls, exploits, finances, and monitors risks from all sources for the purpose of increasing the organization's short- and long-term value to its stakeholders'* [CAS 2003]. Le processus de management du risque peut se décomposer classiquement en une suite d'activités synthétisées dans la Figure 46.

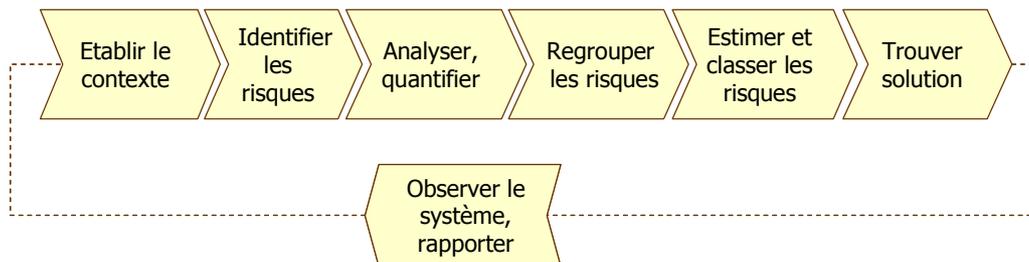


Figure 46: Méthodologie d'approche du risque en entreprise [CAS 2003]

Il faut donc disposer d'outils et de démarches de travail pour supporter ces activités. L'idée consiste à mettre en œuvre les mécanismes de V&V qui ont été développés jusqu'à maintenant dans ce cadre du management du risque.

### a - Problématique

Gérer le risque nécessite d'abord d'en posséder une représentation. Il existe trois grands types d'approche ou de stratégie de modélisation du risque :

- **L'approche systémique MADS-MOSAR** [Perilhon 2003] définit le risque comme une suite d'événements liant un état dit 'source' à un état dit 'cible'. Dans l'état source, le système est caractérisé par une certaine vulnérabilité et il devient réceptif à l'enchaînement de ces événements. L'état cible décrit la concrétisation des dommages potentiels que peut subir le système comme synthétisé dans la Figure 47.

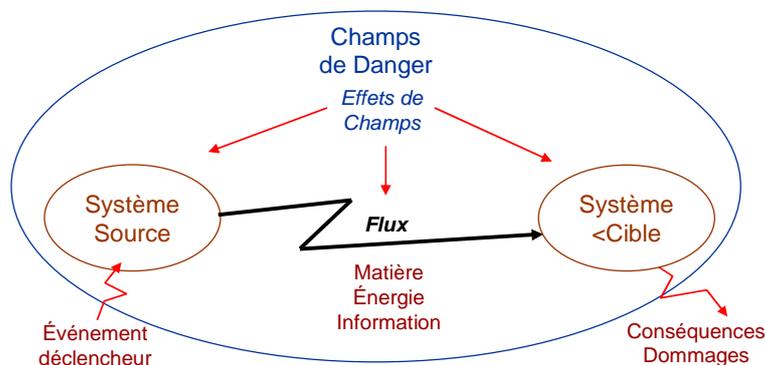


Figure 47 : Le risque selon MADS-MOSAR

Le méta modèle du risque donné dans la Figure 48 a été élaboré à l'origine de ces travaux. Il met en avant des notions importantes : le dommage, les événements (initiateur, renforçateur, etc.) ou encore la vulnérabilité du système qui se décompose en propension, sensibilité et acceptabilité. Ces trois caractéristiques sont effectivement des propriétés importantes caractérisant le système et ses composants où se déroule le phénomène engendrant le risque.

Cependant, les méthodes qui s'inspirent de cette approche, très utilisées en industrie [Tixier 2000], restent difficiles d'usage dans le cas d'un système complexe. En particulier, elles requièrent de connaître les événements et comportements du système dans le passé. Ce sont, en effet, soit des méthodes d'opérationnalisation du risque basées sur des approches statistiques donc utilisant l'historique du système ou d'un équivalent. Ce sont aussi des méthodes basées sur la nécessaire décomposition du système en sous systèmes jusqu'à pouvoir caractériser les uns et les autres par des vulnérabilités définies ou connues a priori (comme cela se pratique par exemple avec l'AMDE, l'AMDEC, l'analyse de criticité, etc.).

- **L'approche des Cindyniques** [Kervern 1995], ou sciences du danger, définit trois concepts essentiels.

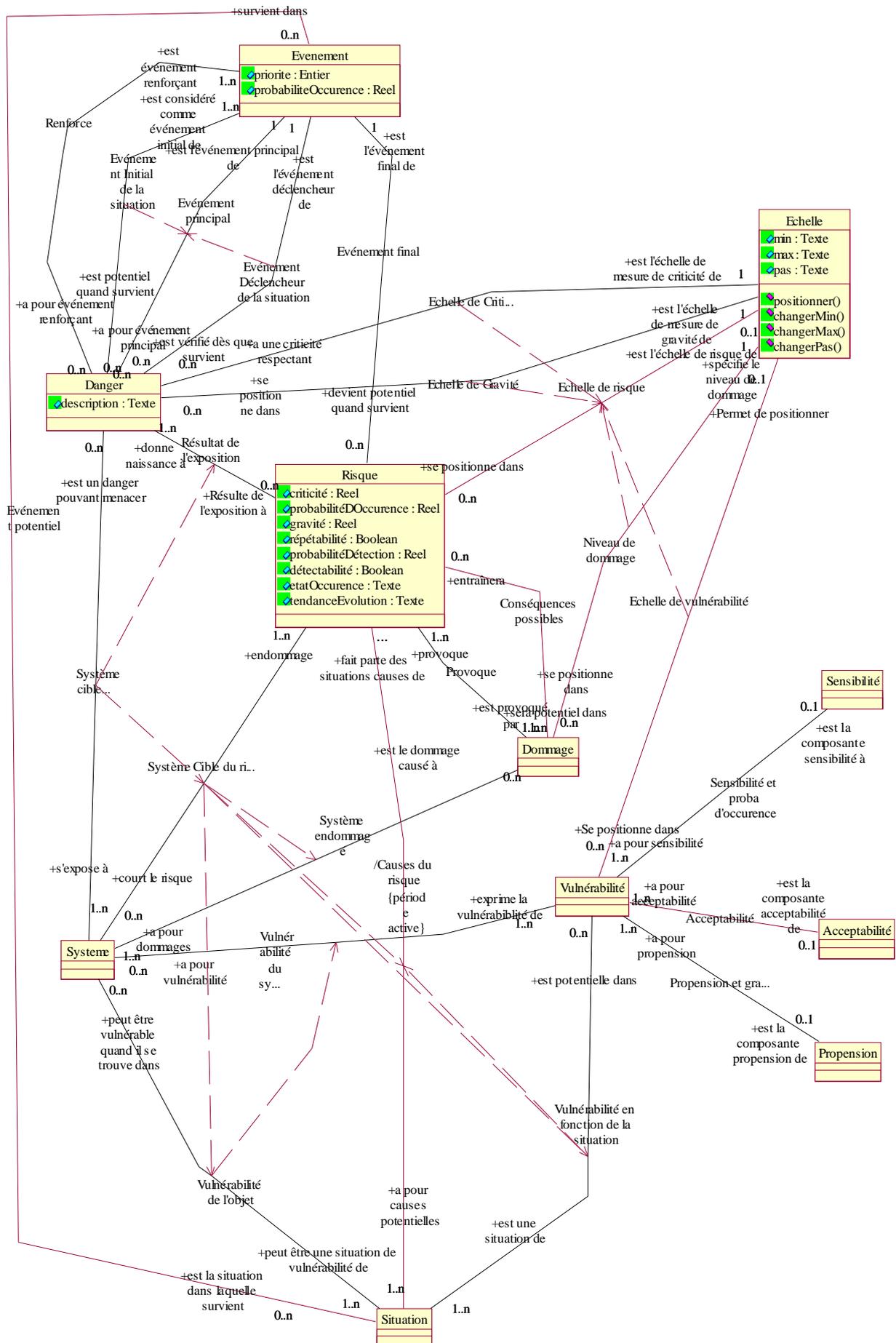


Figure 48: Méta modèle du risque élaboré à partir de l'approche MADS MOSAR

Ce sont :

- un hyperespace du danger multi dimensionnel et suffisamment abstrait dans lequel les causes potentielles du risque et ses conséquences peuvent être plus aisément perçues. Elle s'applique à l'analyse du risque au niveau d'une organisation complexe et non plus seulement au risque d'origine technique, technologique ou naturelle qui sont les champs d'application naturels de MADS-MOSAR.
- la notion de Déficits Systémiques Cindynogènes (DSC) répartis en 32 classes précises
- la notion de dissonances qui exprime une possible divergence de point de vue entre les hyperespaces constitués pour différents groupes d'acteurs faisant partie de l'organisation.

Cependant, ici aussi, si l'on en juge par ses applications sur des cas concrets [Nicolet 1999], elle reste dédiée à l'explication a posteriori du pourquoi ou du comment du risque, pas à son anticipation.

• **L'approche situationniste** décrite dans [Montmain et al. 2006] propose une représentation permettant de mieux comprendre la dynamique d'une crise et donc son impact sur le type de management à adopter. Elle décrit d'abord les 4 situations par lesquelles l'organisation passe en subissant des dommages graduels de plus en plus importants. Elle décrit ensuite la relation qu'il existe entre les différents modes de pilotage pour passer d'une situation à la suivante. La Figure 49 montre cette représentation.

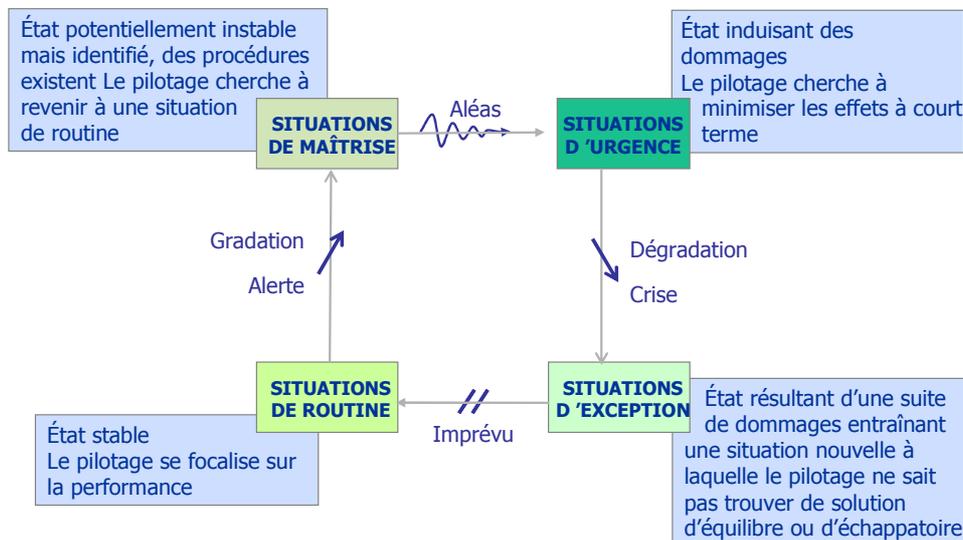


Figure 49 : Relation entre les situations induites et le pilotage

Cette approche permet de formaliser les besoins et les effets d'une stratégie de pilotage du système. Elle reste cependant descriptive et non prescriptive comme les autres approches.

En général, les méthodes basées sur ces approches sont souvent des stratégies d'analyse « a posteriori ». Elles permettent souvent seulement de juger des forces et des faiblesses de plans d'actions passés, d'en tirer des retours d'expériences (REX) permettant d'alimenter la discussion et la recherche d'amélioration. Que peut-on alors faire pour aider un décideur à mieux gérer le risque « a priori » ?

C'est dans le cadre d'une collaboration avec des organismes de santé que ce besoin est apparu et s'est affiné. En effet, la problématique du management du risque d'une organisation de santé (CHU, hôpitaux, cliniques)<sup>23</sup> s'avère être voisine<sup>24</sup> bien que formulée différemment de celle de l'industriel en charge d'une unité de production.

En effet, la mission des établissements de santé est d'assurer la sécurité du patient et la qualité des soins liés à tout acte médical. Cette mission est soumise à des contraintes toujours plus strictes d'ordre médical, humain, éthique, social, financier, légal ou même politique qui entraînent de fait l'évolution de ces structures. Leur organisation s'inspire désormais de plus en plus des approches industrielles recentrées autour de la notion de client, de processus et de cartographie des compétences.

Leur fonctionnement, ordinairement basé sur des services de soins indépendants, évolue vers un fonctionnement par pôles d'activités conformément au plan Hôpital 2007 [Hôpital 2007]. Leur système de financement repose depuis 2005 directement sur le principe de la Tarification à l'Activité (T2A).

Enfin, le cadre général se fait de plus en plus exigeant, qu'il s'agisse des tutelles comme la HAS (Haute Autorité de Santé) à travers la nécessité de la certification [HAS 2004] par exemple et de la mise en place d'une gestion globalisée des risques, de la possible judiciarisation des plaintes ou des médias et du grand public avides de données sur les établissements de santé et tout aussi prompts à les comparer et à les classer sur la base d'indicateurs souvent inadaptés.

En effet, un risque mal maîtrisé induit :

- Une perte de **performance** en termes de disponibilité de service, de respect des contraintes et de satisfaction du client. Plus précisément, un risque iatrogène peut entraîner le décès ou l'invalidité d'un patient, dégrader les indicateurs de fonctionnement de l'établissement, ou générer un niveau d'insatisfaction préjudiciable à la réputation de l'établissement et à l'image (satisfaction, sûreté, sécurité) qu'il cherche à véhiculer.
- Une perte de **stabilité** dans le temps : l'établissement devient inapte à continuer de fournir un service donné dans les conditions requises de qualité, de sûreté et de sécurité. Un mode de fonctionnement dégradé se met alors en place et peut même se pérenniser, situation préjudiciable au fonctionnement normal d'un établissement de santé.
- Une perte d'**intégrité** : les ressources de l'établissement peuvent se trouver incapables d'assumer tout ou partie de leur mission à un instant donné ou l'établissement peut devenir incapable de faire face à une situation d'urgence ou d'exception du fait de certains événements qui n'étaient pas jusqu'ici envisagés.

---

<sup>23</sup> La Haute Autorité de Santé (HAS) souhaite implicitement faire adopter des démarches déjà utilisées et validées dans le milieu industriel pour améliorer la performance des systèmes de santé : approche orientée client basée sur une cartographie des processus de l'unité de soin, notions d'indicateurs de performance, de tableaux de bord, de pilotage, etc.

<sup>24</sup> En faisant bien entendu abstraction des obligations de réserve, légales, de respect humain et social, de nécessaire résultat et de bien d'autres contraintes éthiques et légales liées aux services attendus auprès d'un patient.

Mieux maîtriser le risque devient alors un enjeu majeur. Cela passe par la recherche de défauts ou de dysfonctionnements et leur résolution, par la mise en place de systèmes de vigilance plus évolués, par la prise en compte des compétences des acteurs et des ressources, etc. Certains principes et outils employés dans l'entreprise industrielle et, surtout, l'expérience accumulée sur des problèmes assez voisins, paraissent non dénués d'intérêt et de pertinence vis-à-vis des besoins d'évolution de ces unités de soins. [Leape 2002, Iglehart 1999, Epstein et al. 2002] montrent bien que les professionnels de santé souhaitent effectivement voir apparaître une nouvelle culture d'organisation dans le domaine de la santé. Cependant, plusieurs travaux [Ducq et al. 2005, Grandhay et al. 2004, Jebali et al. 2004] montrent que la transposition de méthodes et d'organisation issues du monde industriel vers le monde médical nécessite une adaptation profonde.

Il est donc nécessaire de repenser la phase de modélisation et en particulier de faire une ingénierie cohérente de la modélisation d'un système de santé.

### **b - Contribution**

J'ai proposé le sujet et commencé d'encadrer en 2001 la thèse de D.Gharbit. Il s'agissait de formaliser une approche de modélisation et d'analyse de systèmes complexes pour détecter la propension du système à se retrouver dans une situation à risque. Le travail théorique entrepris a permis de jeter les bases d'une approche de modélisation et de publier ces résultats prometteurs dans deux conférences internationales (CI5, CI10). Cette thèse a cependant dû être arrêtée pour des raisons personnelles à l'étudiant.

J'ai donc été amené à proposer à nouveau et à encadrer la thèse de S.Aloui (T3, taux d'encadrement de 80%) pour continuer le travail engagé. Le domaine d'application choisi est le domaine de la santé. Cette thèse est en cours et un certain nombre de résultats importants sont déjà acquis, publiés et en cours de validation chez notre partenaire, le CHU de Nice.

Nous avons tout d'abord développé et formalisé une démarche de modélisation adaptée à la problématique du pilotage d'un système de santé en situation de risque. Cette approche s'inspire à la fois de la démarche systémique SAGACE, des principes de méta modélisation définis par la MDA et utilise des langages issus de la modélisation d'entreprise et de la modélisation des systèmes.

Ces langages ont été choisis parmi ceux existant pour la qualité de la couverture de modélisation de connaissances qu'ils offraient pour chacune des trois vues classiques : eFFBD, KAOS, Idef, UEM, Statecharts, LUSP, MADS-MOSAR et Diagramme de classes UML. Leur intégration dans une approche de modélisation 'unifiante', et quelquefois leur adaptation aux besoins spécifiques du système de santé, est basée sur la création d'un méta modèle unique tel que préconisé dans l'approche MDA et décrit dans la Figure 50.

Enfin, une quatrième vue, la vue Propriété, vient compléter l'information à disposition du modéleur. Un référentiel de propriétés traduisant les attentes de l'HAS est ainsi proposé comme un enrichissement du référentiel de la modélisation d'entreprise qui existait déjà auparavant.

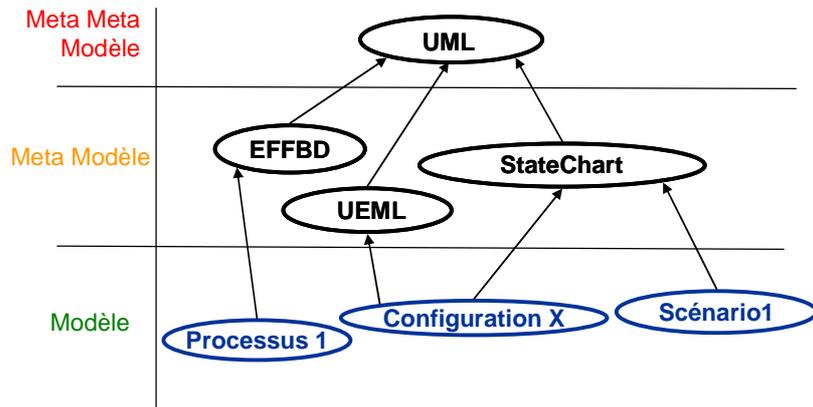


Figure 50 : Multi formalisme et nécessaire méta modèle commun

Nous développons ensuite de nouveaux mécanismes de preuve toujours basés sur l'utilisation des Graphes Conceptuels pour détecter des situations à risques en respectant quatre hypothèses de travail :

- Le risque est à l'origine de dommages se traduisant par une perte de performance, de stabilité et d'intégrité. Une (ou plusieurs) propriété(s) permet(tent) de modéliser ces liens causaux. Si une telle propriété ne peut en aucun cas être vérifiable, l'interprétation de cette propriété cache-t-elle une erreur de modélisation ou d'un risque avéré ?
- Comme dit plus haut, les Cindyniques proposent un référentiel de Déficits Systémiques Cindynogènes (DSC) dont la Figure 51 montre le principe et donne une liste partielle.

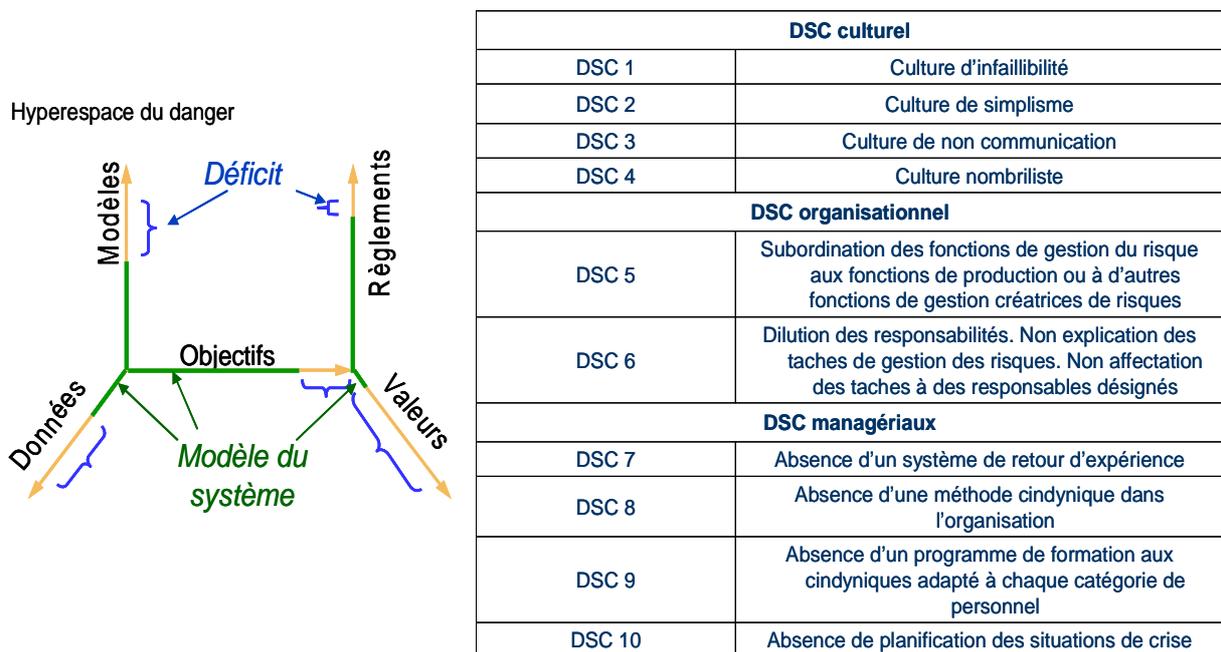


Figure 51 : Hyperespace du danger et DSC

Un déficit est une ambiguïté ou une incohérence dans la représentation de l'hyper espace du danger : absence d'un espace, lacune au sein d'un espace, disjonction entre 2 espaces ou encore absence d'ordre dans un espace. Si le système modélisé peut être sensible ou s'il est sujet à un de ces déficits, il court donc un risque comme schématisé dans la Figure 52 qui montre un exemple de processus de distribution de médicament. L'objectif est alors de

décrire ce mécanisme de DSC sous forme d'une propriété, donc d'une relation entre les causes et les effets du déficit.

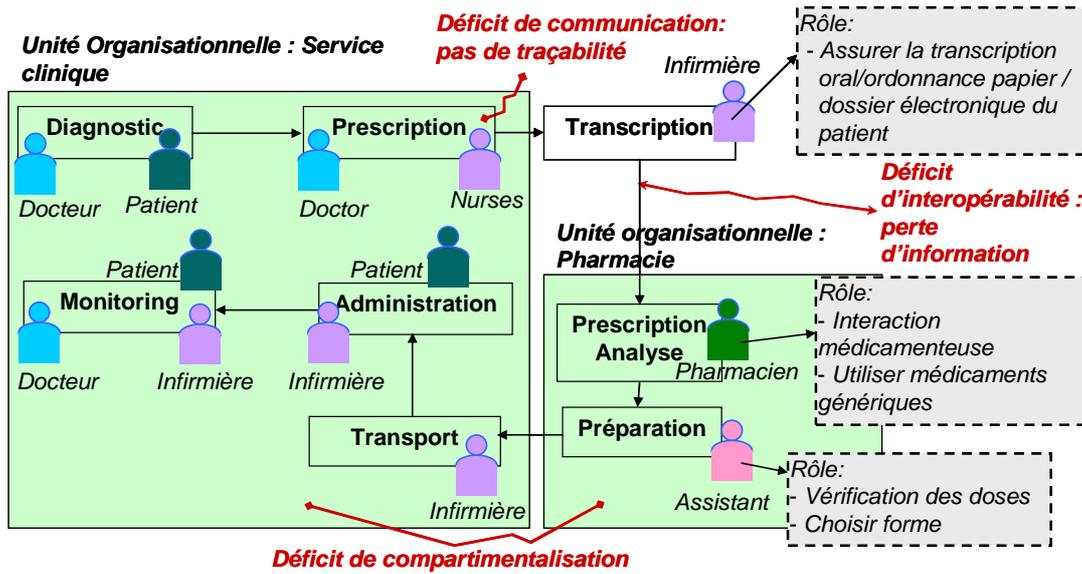


Figure 52 : Exemples de déficits dans un processus de distribution de médicament

- Les Cindyniques mettent ensuite en avant le principe de dissonance, c'est-à-dire de possibles avis divergents dans un groupe d'acteurs durant une étape de modélisation. Ces dissonances, dont deux types distincts sont schématisés sommairement Figure 53, trouvent leurs origines dans des interprétations différentes des objectifs, de la finalité, de l'usage et de l'utilisation des ressources. Chaque dissonance peut ainsi cacher une situation entraînant des risques liés à la compréhension du système, au rôle de chacun, etc.

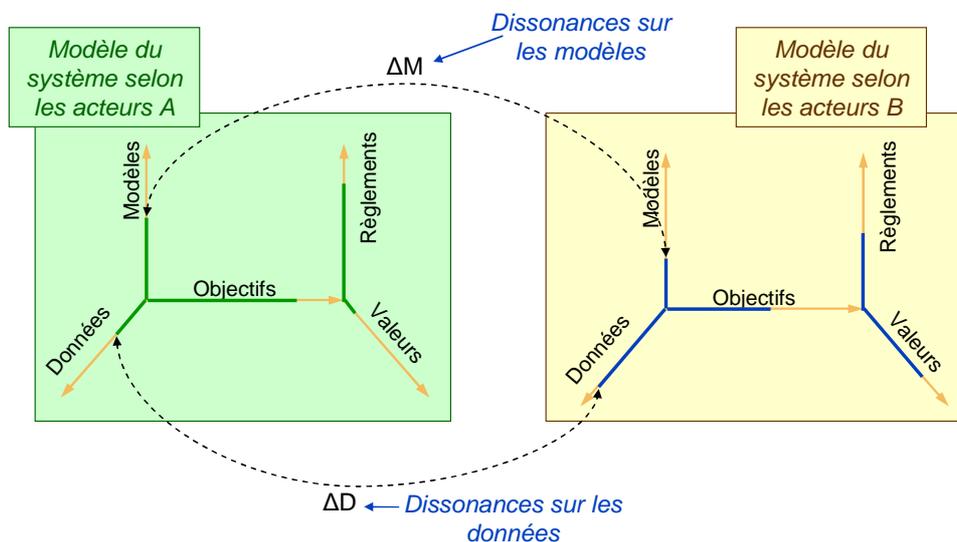


Figure 53 : Dissonances

- Enfin, la Haute Autorité de Santé (HAS) a élaboré un référentiel de certification contenant plusieurs exigences imposées aux systèmes de santé pour pouvoir rester opérationnels. Parmi ces exigences, plusieurs se rapportent à la gestion des risques. Leur non respect entraînerait automatiquement la fermeture à plus ou moins long terme de l'établissement. Nous proposons donc de modéliser ces exigences avec des propriétés

système. Leur non vérification cachera alors, soit une erreur de modélisation, soit une exigence non respectée.

Plusieurs modèles de plusieurs vues doivent être simultanément pris en compte pour prouver une propriété. L'intérêt de notre approche est de proposer un graphe conceptuel cible unique et intégrant tous les concepts et toutes les relations venant de modèles issus de ces différentes vues<sup>25</sup>.

Cette partie du travail de recherche, qui est appliquée dans le CHU partenaire de Nice, a déjà fait l'objet d'un article dans une revue nationale (RN1), de quatre articles dans des conférences internationales (C12, C14, C16, C17), quatre articles dans des conférences nationales (CN2, CN3, CN4, CN5) et de plusieurs présentations dont (PT1).

**Nous disposons ainsi d'une approche illustrée Figure 54 qui permet la vérification de plusieurs modèles par des principes d'intégration multi vue et multi langages de modélisation ainsi que l'analyse des causes et effets d'une situation.**

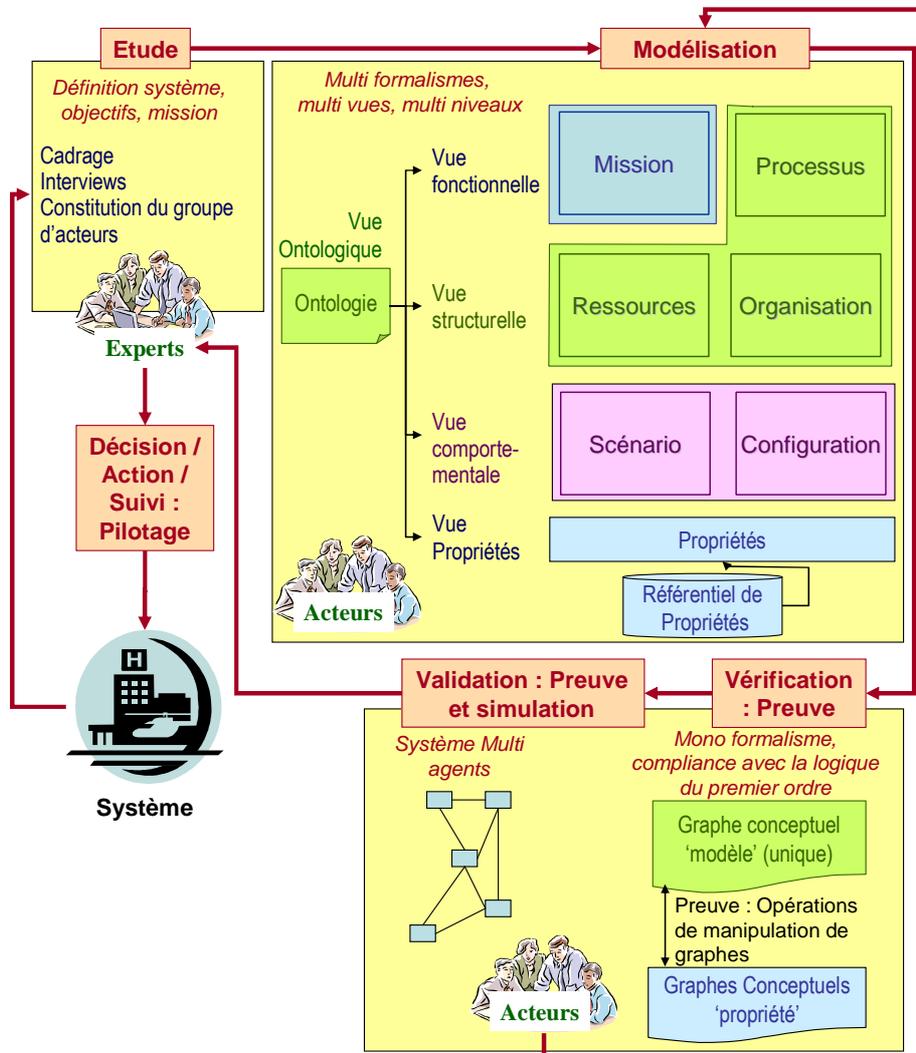


Figure 54 : Processus de modélisation / analyse multi formalisme / simulation

<sup>25</sup> L'hypothèse étant bien entendu que les langages de modélisation utilisent le méta modèle commun permettant d'unifier le sens des concepts et des relations utilisées dans une vue ou dans une autre. C'est actuellement un cas de figure envisageable en modélisation d'entreprise avec le langage UEML version 2 (Unified Enterprise Modelling Language)

Enfin, s'appuyant sur ces résultats depuis fin 2004, je co-encadre en collaboration avec D.Crestani du LIRMM, la thèse de Y.Ben Zaïda (T5 avec un taux d'encadrement de 50%). Il s'agit de développer une approche d'aide à la décision au niveau du pilotage stratégique de l'entreprise [Harzallah 2000]. L'idée est de formaliser ici ce qu'est le risque stratégique et d'outiller une démarche d'analyse pour le décideur en charge du pilotage du changement dans l'entreprise.

## 9 - RESULTATS

Les résultats de ce travail, correspondant à l'essentiel de la recherche, sont synthétisés dans le Tableau 6.

<b>Encadrement</b>	<b>4 thèses de doctorat</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• deux soutenues (T1 avec un taux d'encadrement de 50%, T2 avec un taux d'encadrement de 80%)</li> <li>• deux en cours (T3, T4) (T3 avec un taux d'encadrement de 80%, T4 avec un taux d'encadrement de 50%)</li> </ul>
	<b>2 DEA</b> (DEA5, DEA6)
	<b>Travaux d'élèves</b> dans la thématique de recherche (PL, IR/ES/FCR)
	<b>Stagiaires</b> (STA2, STA3, STA4)
<b>Publication</b>	<b>3 articles</b> dans des revues internationales
	<b>3 articles</b> dans des revues nationales
	<b>23 articles</b> dans des conférences internationales
	<b>8 articles</b> dans des conférences nationales
	<b>2 chapitres</b> dans des ouvrages collectifs à diffusion restreinte (OC1, OC2)
	<b>Plusieurs rapports de recherche</b> (dont RR1 à RR7) et <b>plusieurs rapports intermédiaires ou de fin de contrat</b> de projets (européens, nationaux et régionaux)
<b>Plusieurs présentations de travaux</b> dans le cadre de la communauté de recherche et dans le cadre d'activités de transfert de cette recherche	
<b>Développement</b>	<p>Outil support du langage de modélisation de processus (MOV)</p> <p>Cadre de modélisation de systèmes complexes (sous GME)</p> <p>Première version d'un atelier prototype supportant le Langage Unifié de Spécification de Propriétés (LUSP) pour la modélisation de propriétés et de référentiels de propriétés</p> <p>Prototype d'un outil de preuve de propriétés (sur la base de la bibliothèque COGITANT 5)</p>

<b>Transfert</b>	<p>Implication dans la réalisation et/ou le montage de projets européens, plusieurs projets nationaux et régionaux.</p> <p><i>Un descriptif des projets essentiels est donné page 124.</i></p>
------------------	--

Tableau 6 : Synthèse des résultats essentiels sur cette thématique de la modélisation d'entreprise

Outre ces résultats, j'ai publié un article de synthèse sur la VVQC en modélisation d'entreprise dans une conférence internationale (CI3), une publication dans une conférence nationale (CN7) concernant une certaine vision des liens entre V&V et l'ingénierie des systèmes.

J'ai collaboré à un article de synthèse de l'avis français sur UEML dans une conférence nationale (CN6).

J'ai présenté les travaux de recherche dans divers cadres et devant divers auditoires industriels et académiques dont seuls les plus marquants sont cités dans ce document (PT2, PT3, PT4, PT6, PT7)

J'ai collaboré enfin à deux chapitres d'ouvrage à diffusion restreinte (OC1, OC2). OC1 traite de l'importance dans un système de décision de disposer de tous les outils méthodologiques nécessaires pour, d'une part, modéliser un problème de manière ouverte et selon plusieurs points de vue (problème de modélisation), d'autre part, s'assurer que le modèle obtenu est une représentation pertinente de ce problème (problème de validation). OC2 donne un avis synthétique sur les besoins et les réponses actuelles venant du domaine des Sciences Pour l'Ingénieur (SPI) pour répondre au thème développé dans le cadre de l'Action Spécifique ADESI (Aide à la Décision pour l'Evolution socio technique des Systèmes Industriels).

Etant impliqué dans le projet européen appelé PABADIS'Promise (voir page 124) depuis début 2005, j'ai collaboré à deux articles (CI1, CI5) présentant les résultats de méta modélisation et de vérification de système. Ces deux articles ont été présentés dans le cadre de conférences internationales. Ces travaux ont fait aussi l'objet de la présentation PT14 et de plusieurs rapports et livrables dont RR7.

Enfin, le projet ISYCri (voir page 125) débuté en Janvier 2007 a donné lieu à un article de présentation dans une conférence nationale (CN1).

## E - PERSPECTIVES : PROJET DE RECHERCHE

Je souhaite maintenant conforter et prolonger de manière cohérente la recherche entreprise jusqu'à aujourd'hui. Il y a donc deux **niveaux de développement** que je propose :

- La confortation des résultats passés.
- L'exploration et la conceptualisation du domaine de l'évolution des systèmes.

Je choisis en même temps de **rapprocher deux domaines** à la fois de recherche et d'application conceptuellement très proches l'un de l'autre mais pourtant éloignés dans l'esprit de certains chercheurs. Ces domaines sont la modélisation d'entreprise et l'ingénierie des systèmes. Dans les deux cas, une application des travaux visera le domaine du risque.

## 1 - CONFORTATION

Le but est de consolider d'abord les travaux existants puis de les étendre aux tâches de qualification et de certification.

### a - Consolidation

Il faut d'abord améliorer les techniques de preuve basées sur les mécanismes de règles et de contraintes associés aux graphes conceptuels. Il est nécessaire pour cela de formaliser et d'intégrer toute la chaîne de réécriture et de manipulation de graphes conceptuels dans un ensemble cohérent. C'est un travail de fond sur la formalisation et une nécessaire prise de recul qui est nécessaire.

Il s'agit ensuite de développer un atelier intégré dans lequel l'ensemble des résultats (LUSP et mécanismes de preuve) pourront devenir opérationnels et transférables vers la communauté. Ce n'est évidemment pas une activité de recherche mais plutôt d'ingénierie qui est alors visée.

### b - Qualification / Certification

Un modèle reste une image fictive du monde réel à la fois dans sa forme, dans l'espace et dans le temps. C'est effectivement une abstraction qui filtre et biaise la réalité selon un point de vue, pour répondre à un objectif précis et cela à chaque étape du cycle de vie d'un système.

Pour ces raisons, il reste difficile d'accorder du crédit à un modèle qui n'est pas le nôtre, de certifier à d'autres acteurs à la fois la généricité, la qualité et la pertinence d'un modèle donné, de qualifier un modèle par rapport à une liste d'attentes potentielles ou encore d'homologuer un modèle pour un usage convenu.

Il s'agit donc ici encore de conférer à un modèle un niveau de confiance supplémentaire attesté pour un but précis.

Par exemple, un processus d'ingénierie système s'alimente de modèles venant des étapes précédentes et en propose d'autres ou les fait évoluer aux étapes suivantes. La notion de modèles de référence, la gestion de versions, l'éventuelle réutilisation de modèles existants ou encore la qualification d'un modèle à des fins de lancement de production en série sont évidemment cruciales.

Dans le cadre de la modélisation d'entreprise par contre, il n'est pas commun ou aisé de faire évoluer un modèle<sup>26</sup>, de réutiliser tout ou partie d'un modèle existant dans d'autres cas de figures et de projets. Par exemple, les architectures proposées par Zachmann, l'EA framework ou GERA ne proposent pas réellement de modèles de référence, et n'imposent pas de langages de modélisation. Elles mettent essentiellement en avant des besoins de représentation et les nécessaires articulations entre les différents modèles que les acteurs

---

<sup>26</sup> Il n'existe pas à proprement parlé de tâche de modélisation, de maintenance et de gestion de modèle dans l'entreprise. Un modèle est bâti à la demande et considéré à priori comme inutilisable en dehors du périmètre du projet pour lequel il a été construit. De plus, le travail de modélisation est généralement fait par un acteur extérieur, consultant en organisation ou chargé de l'installation d'un ERP par exemple. Le résultat reste donc difficilement exploitable par les acteurs de l'entreprise.

devront construire. Il est bien sûr impossible d'envisager des modèles de type modèles 'à trous' ou des modèles dont l'utilisation se limiterait à un simple paramétrage. Ce serait peut-être une solution idéale mais totalement infaisable et incompatible avec la réalité mouvante de l'entreprise.

***Le but est donc ici de développer des mécanismes de certification ou d'homologation de modèles en se basant sur les approches formelles qui ont été mises en œuvre au cours de cette recherche.***

## **2 - EXPLORATION / CONCEPTUALISATION**

### **a - Evolution des systèmes**

Il existe de nombreux travaux inspirés de la théorie des systèmes, de la dynamique des systèmes et de démarches plus empiriques [Mann 2002] pour tenter de conceptualiser et de formaliser comment un système peut anticiper sa nécessaire évolution.

Certains de ces travaux se fondent sur l'hypothèse que cette évolution :

- **Est prévisible** : il existe des lois d'évolution, certes très générales, souvent très empiriques et validées seulement statistiquement, qui permettent de caractériser, de mesurer et de valider une amélioration d'un système. Toute évolution du système, de son développement à son démantèlement en passant par son exploitation, devrait respecter ces lois. Autrement dit, une proposition d'amélioration, de conception ou de pilotage qui ne suive pas ces principes peut et doit être remise en cause avant son application.

- **Nécessite généralement de comparer plusieurs alternatives**. Celles-ci sont cependant souvent des compromis qui ne satisfont pas toujours les acteurs. Par exemple, on peut sans doute penser améliorer la performance d'une ligne de production par une décentralisation de certaines fonctions qui sont normalement assumées par cette ligne mais cela se fera au détriment de la logistique dont le coût peut devenir prohibitif à court terme si, par exemple, le prix des ressources pétrolières augmente encore. Chaque alternative peut bien sûr être justifiée et validée a priori et pour un temps (« *faisons au mieux et laissons aux autres le soin de corriger plus tard...* ») mais ce ne sont pas réellement des solutions. Elles ont une durée de vie nécessairement limitée et elles doivent donc être réexaminées car elles sont susceptibles de devenir à plus ou moins longue échéance les causes de nouveaux problèmes. L'environnement dans lequel évolue un système est mouvant, souvent de manière plus ou moins incontrôlable et les solutions sont choisies sans connaître et surtout sans disposer à l'avance de tous les indicateurs pertinents et nécessaires.

***Le but est ici de :***

- ***Développer des référentiels de propriétés système et axiomatiques formalisant ces lois d'évolution en intégrant nécessairement la notion de temps et de dynamique du système.***

- ***Développer des mécanismes d'enrichissement graduel de modèles de système (en quelque sorte de versionnement de modèles) qui prennent en compte les différents types de raffinement possibles.***

- **Développer et adapter les mécanismes de vérification basés sur les graphes conceptuels pour analyser a priori les évolutions proposées. Ces mécanismes permettent de s'assurer du respect des propriétés axiomatiques à la fois entre chaque version du modèle, entre chaque vue de modélisation, pendant et entre chaque étape du cycle de vie d'un système au cours desquelles ces modèles sont établis.**

L'application consiste à intégrer et à outiller ces mécanismes dans un processus type d'ingénierie et d'intégration de système au cours duquel nombre de modèles cohabitent et doivent être cohérents. En effet, ils décrivent chacun un point de vue du système : organique en mettant en avant par exemple la nécessaire réutilisation de composants existants, fonctionnel ou comportemental. Il faut donc, une fois de plus, vérifier et valider la cohérence de modèles mais en tenant compte maintenant non plus seulement d'attentes client, mais aussi en fonction de propriétés axiomatiques liées à ces lois d'évolution. Le résultat peut se concrétiser sous la forme d'un guide à la fois conceptuel, méthodologique et doit reposer sur un cadre formel.

### **b - Emergence de comportements**

Un système complexe est le siège d'interactions dynamiques entre des composants ou des sous systèmes de nature hétérogène. Ces interactions sont généralement étudiées et analysées. Cependant, leur nombre, leurs caractéristiques propres, leur dynamique d'évolution sont autant de facteurs favorisant l'émergence de phénomènes et de comportements observables sur le système lui-même.

Ces phénomènes peuvent avoir des effets intéressants bien que surprenant a priori auquel cas, on souhaitera les exploiter, les rendre reproductibles voire améliorer leurs effets. Ils peuvent aussi être indésirables et nuisibles car à l'origine de dérèglements et de risques, auquel cas le système peut subir des dommages modifiant ses capacités opérationnelles.

Ils sont de toute façon a priori imprévisibles, donc méconnus des acteurs. Ils sont donc mal maîtrisés, qu'ils aient une influence positive ou négative sur les performances, l'intégrité ou la stabilité du système résultant.

De même, un système complexe évolue et se transforme tout au long de son cycle de vie soit dans le cadre d'une amélioration guidée et voulue, soit sous l'action de son environnement, soit parce que ses composants eux-mêmes se transforment et s'adaptent. Cette transformation entraîne à nouveau la modification plus ou moins rapide<sup>27</sup> des capacités et des aptitudes du système à remplir sa mission voire à modifier celle-ci, ses caractéristiques de temps, d'espace et de forme et son comportement (évolution des modes de fonctionnement, nouveaux scénarios ou nouvelles situations, nouveaux états<sup>28</sup> que le système peut atteindre, etc.).

---

<sup>27</sup> L'aptitude des composants d'un système à l'auto organisation et/ou à l'auto apprentissage de situations nouvelles accélèrent encore ce processus d'évolution du système, compliquant ainsi encore le travail du modéleur.

<sup>28</sup> Rappelons qu'un état peut être stable, auquel cas le comportement peut devenir reproductible. Il peut aussi être instable auquel cas le comportement peut être considéré comme aléatoire, fugitif et d'autant plus difficilement explicable et compréhensible.

***Le but est ici d'étudier et de proposer une approche mixant formel et simulation pour conceptualiser ce phénomène d'émergence de comportement. L'intérêt est multiple tant en cours de conception dans le cadre d'un processus d'ingénierie de système devant être le plus exhaustif possible, qu'en pilotage en ligne ou hors ligne pour mieux connaître l'évolution possible du système en cause.***

### **3 - ORGANISATION**

Pour mettre en œuvre ces propositions, les travaux vont s'appuyer dans les prochaines années sur des élèves chercheurs dont les sujets de thèse seront les suivants.

#### **a - Techniques de preuve temporelle**

Il faut faire évoluer l'outil et les concepts de preuve multi formalisme et multi vue que nous proposons actuellement vers la prise en compte de la preuve de propriétés incluant une dimension temporelle.

Les model checkers proposent déjà des approches symboliques du temps. Cependant, comment éviter les écueils classiques de tels outils qui deviennent vite inappropriés dès que la taille du modèle à analyser devient conséquente ou que sa richesse sémantique est par trop importante ?

D'autres approches basées sur des théories algébriques sont depuis longtemps considérées comme prometteuses. Il s'agit donc de formaliser une approche combinant calcul symbolique, algèbre et Graphes Conceptuels.

En effet, le formalisme utilisé pour prouver des propriétés est basé essentiellement aujourd'hui sur les Graphes Conceptuels. Ce langage, à la fois langage de modélisation et langage d'analyse formelle de la connaissance, a été choisi car il est encore aujourd'hui sans doute le mieux formalisé et le mieux outillé conceptuellement parlant pour vérifier formellement la cohérence de connaissances.

Il est par contre difficile de représenter toute notion relative au temps, au fonctionnement ou à l'évolution dynamique de cette connaissance en fonction d'événements ou de situations.

Il n'est pas seulement question ici de seulement représenter le temps. Certes, c'est déjà une problématique sur laquelle se penchent les utilisateurs des Graphes Conceptuels. Mais il s'agit ici de pouvoir décrire de manière formelle la dynamique d'un système telle qu'elle peut par exemple être perçue au travers de la sémantique opérationnelle d'un langage de modélisation.

On ne doit plus seulement décrire de manière exhaustive toute la connaissance que l'on a d'un système à un instant donné. On doit aussi devenir capable de décrire comment cette connaissance peut être utilisée pour représenter la dynamique d'un système évoluant dans un espace-temps donné.

Le but de cette recherche est donc de développer une extension des graphes conceptuels baptisés alors Graphes Conceptuels Temporels permettant la modélisation et l'analyse de la connaissance (statique et dynamique).

## **b - Combinaison preuve et simulation distribuée**

L'émergence est vue ici comme un phénomène a priori incontrôlable et dont les causes sont diffuses dans le réseau d'interactions entre différents composants hétérogènes et des sous systèmes dynamiques. L'ensemble évolue de plus de manière asynchrone dans un environnement lui-même changeant et modifiant ses relations avec le système en fonction de ses besoins. Il existe actuellement nombre de tentatives d'explications dans plusieurs domaines (biologie sociologie, etc.), de caractérisation ou de prévision de ce phénomène. Elles sont basées essentiellement sur des théories mathématiques (théorie des catégories appliquée à la conception de systèmes d'information par exemple), la théorie des jeux, du chaos, des fractales ou encore sur l'usage de certains types d'algèbres.

Je souhaite explorer une autre voie basée sur la complémentarité entre l'approche formelle que nous avons développée jusqu'à maintenant et des approches d'intelligence artificielle. En effet, les résultats actuels de la recherche permettent de vérifier et de valider, au moins partiellement, simultanément plusieurs modèles et certains types de propriétés. Il est donc proposé d'utiliser conjointement cette technique essentiellement 'mécaniste' et mathématique avec une approche de type système multi agents (SMA).

L'approche SMA permet en effet de décrire, pour chaque vue et chaque niveau de détail, une population d'agents possédant chacun leurs propres comportements, dotés d'une capacité à l'auto apprentissage de situation, à l'auto organisation en se basant sur des modes plus ou moins évolués, voire restrictifs, de communication, de négociation et d'échange avec d'autres agents. La simulation des comportements des agents associés à chaque niveau, sans posséder a priori de schéma d'interaction entre chacun de ces agents, c'est-à-dire de modèles de scénarios, de configurations et de situations, permet effectivement de faire apparaître certains comportements imprévus, certains effets de bord. Par exemple, deux robots de transport autonomes se portant l'un l'autre peuvent en effet permettre économiser de l'énergie et de la place puisque le robot porté ne consomme plus, n'occupe plus de place.

Cependant, cette simulation peut converger très lentement voire ne pas converger du tout vers l'apparition d'un phénomène nouveau. L'approche de preuve que nous proposons s'avère assez rapide à mettre en œuvre pour assurer la vérification de manière dynamique d'un graphe de propriétés. Ces propriétés spécifient des relations devant implicitement être maintenues ou au contraire ne jamais exister entre certaines caractéristiques de temps, d'espace et de forme des agents d'un niveau de détail donné sous peine d'une modification d'une autre caractéristique de performance, d'intégrité et/ou de stabilité de l'un des agents du niveau de détail supérieur et ce, quel que soit le lien (de décomposition, d'abstraction ou d'équivalence comportementale) unissant cet agent avec les précédents. Le graphe des propriétés est alors un graphe causal connexe et dynamique qui permet de détecter de possibles liens entre des caractéristiques de certains agents en cours de simulation. Il devient alors possible de forcer ces agents à s'initialiser et à adopter un état donné. La simulation, guidée à partir de cet état, peut alors impliquer une nouvelle modification des valeurs de véracité des propriétés du graphe. L'analyse du graphe permet donc de 'guider' le comportement des agents vers des états sensibles, par exemple sujets à blocage, à modification de la mission initiale de l'agent, à l'augmentation de son niveau de connaissance ou de conscience.

Afin d'étoffer l'actuel référentiel de propriétés, il est proposé de se baser sur les 4 vues de modélisation proposées dans le cadre de la thèse de S.Aloui. La modélisation selon l'approche multi vue et multi formalismes permet effectivement de rendre compte des caractéristiques du système (Temps, Espace ou Forme), de son comportement (ses états, ses transitions, ses scénarios opérationnels, les configurations de ses ressources sans lesquelles il ne peut fonctionner, etc.), de ses fonctions et de son organisation. Ces caractéristiques évoluent ensuite selon les lois d'évolution des systèmes évoquées plus haut.

Par exemple, une loi dite de développement inégal des parties suggère qu'un système doit se développer harmonieusement sachant que le système considéré ici est un système technique possédant sa propre logique de contrôle (permettant de s'assurer de l'atteinte des objectifs fixés au système et de rendre compte de la mission remplie), des capacités à fournir et à transmettre l'énergie nécessaire (il possède une source d'énergie interne ou a la possibilité de transformer tout ou partie d'une énergie externe en une énergie interne), et enfin ses propres organes effecteurs chargés alors de remplir les différentes fonctions du système.

La démarche proposée consiste donc à modéliser ces lois d'évolution sous forme de propriétés systèmes et axiomatiques venant renforcer le référentiel de propriétés. Il faut ensuite formaliser et développer une approche de simulation multi agents symbolique guidée par les mécanismes de preuve permettant effectivement d'explorer plus profondément et plus rapidement certaines combinaisons comportementales des composants et des sous-systèmes

#### **4 - APPLICATION**

Les domaines d'application visés sont effectivement la modélisation d'entreprise et l'ingénierie des systèmes. Il s'agira de démontrer l'usage possible des techniques et concepts développés :

- A des fins de qualification et de certification de modèles à la fois au cours de processus d'IS et dans le cadre de développement de modèles d'implémentation en Modélisation d'Entreprise.
- A la recherche, l'analyse et la maîtrise de situations à risque. Le risque est associé à une dérive potentielle, combinée ou non, de la performance, de la stabilité et/ou de l'intégrité du système. Le but est donc de développer une approche permettant de piloter, d'adapter et d'anticiper le comportement du système pour réduire cette dérive. Le domaine applicatif privilégié ici concerne le pilotage et l'évolution d'une organisation de santé.

#### **F - BIBLIOGRAPHIE**

Voici la liste des références bibliographiques autres que celles dont je suis un des auteurs et qui sont déjà citées dans la partie 'Synthèse des Résultats' page 111. Ces références sont nécessaires pour comprendre et resituer le travail de recherche à la fois dans la communauté française et dans la communauté internationale.

[Abrial 1996] J-R.Abrial, The B-Book: Assigning programs to meaning, Cambridge University Press, 1996

- [Accelera 2004] Accelera Formal Verification Technical Committee (FVTC), PSL Property Specification Language Reference Manual, Version 1.1, see <http://www.eda.org/vfv/> (2004)
- [Adepa 1992] ADEPA/AF CET, Le GRAFCET: ouvrage de référence, Cepadues Editions - Coll. Automatisation et Production, 1992
- [Allen 1984] J. F. Allen, Towards a general theory of action and time, Artificial Intelligence, volume 23, pages 123-154 (1984)
- [Alur et al. 1991] R.Alur, T.A. Henzinger, Logics and Models of Real Time: A Survey, Real-Time: Theory in Practice, REX Workshop, LNCS 600, pp. 74-106, 1991
- [Alur et al. 1993] R.Alur, C.Courcoubetis, D.L.Dill, Model-Checking in Dense Real-time, Information and Computation journal, volume 104 n°1, pages 2 à 34, 1993
- [Amice 1994] ESPRIT Consortium AMICE, CIMOSA: Open System Architecture for CIM, Springer Heidelberg, 1994
- [ARCHWARE 2004] ARCHWARE, European Architecting Evolvable Software project, IST 2001-3236, 2004 (see <http://www.archware.org/>)
- [Arkin 2002] A.Arkin, Business Process Modeling Language BPML 1.0 (see [www.BPMI.org](http://www.BPMI.org)) (2002)
- [Arnold 1992] A.Arnold, Systèmes de transitions finis et sémantiques des processus communicants, Editions Masson, 1992
- [Audureau et al. 1990] E.Audureau, P.Enjalbert, L.Fariñas del Cerro, Logique temporelle. Sémantique et validation de programmes parallèles, Editions Masson, 1990
- [Aygalcinc et al. 1993] P.Aygalcinc, J.P.Denat, Validation of fonctionnal Grafcet models and performance evaluation of the associated system using Petri Nets, APII AFCET/CNRS, Ed. Hermes, vol 27, n°1, p 81 to 93, Mars 1993
- [Badoual 2004] Y.Badoual, Impact sur l'organisation et les conditions de travail des nouveaux modes de gestion reposant sur lesERP/PGI, Séminaire ARACT, Juin 2004
- [Baget 2001] J.F. Baget, Représenter des connaissances et raisonner avec des hypergraphes : de la projection à la dérivation sous contraintes, Thèse de Doctorat de l'Université Montpellier 2, 2001
- [Baget et al. 2002] J-F.Baget, M-L.Mugnier, Extensions of Simple Conceptual Graphs: the Complexity of Rules and Constraints. Journal of Artificial Intelligence Research (JAIR), vol. 16, 2002, pages 425-465
- [Balci 1998] O.Balci, Verification, Validation and Accreditation, Proceedings of the 1998 Winter Simulation Conference, D.J. Medeiros, E.F. Watson, J.S. Carson and M.S. Manivannan, eds.
- [Balci et al. 2002] O.balci, W.Ornwsby, Expanding our horizons in verification, validation and accreditation research and practice, 2002 Winter Simulation Conference, E. Yücesan, C.-H. Chen, J. L. Snowdon, and J. M. Charnes (éditeurs), 2002
- [Barnat et al. 2000] J.Barnat, L.Brim, J.Stribrna, Distributed LTL Model Cheking in SPIN, Faculty of Informatics Masaryk University (FIMU) Report RS-2000-10, Novembre 2000
- [Base-PTA 1992] Norme expérimentale Base-PTA, CCGA - ISMCM/CESTI, Septembre 1992
- [Benghazi 2006] K.Benghazi Akhlaki, M.I.Capel Tuñon, J.A.Holgado Terriza,L.E Mendoza Morales, Formal Specification of Real-Time Systems by Transformation of UML-RT Design Models, Procceding du 4ème worksho international Modelling, Simulation and Verification of Enterprise Information Systems MSVVEIS, Satellite event of ICEIS, International Conference on Enterprise Information systems, Paphos, Chypre, 23 au 27 mai 2006
- [Benzaken 1991] C. Benzaken, Systèmes Formels. Introduction à la logique et à la théorie des langages. Editions Masson, 1991
- [Bérard et al. 2001] Bérard B., Bidoit M., Finkel A., Laroussinie F., Petit A., Petrucci L., Schnoebelen Ph. McKenzie P. Systems and Software verification: model checking techniques and tools, Springer (2001)
- [Bernus 2003] P.Bernus, Enterprise models for enterprise architecture and ISO9000:2000, Annual Review in Control, 2003, n°27, p211-220, Pergamon P ress
- [Bernus et al. 2003] P.Bernus, K.Mertins, G.Schmidt, Handbook on architectures of information systems, Springer, 2003

- [Berrah 1997] L.Berrah, Une Approche d'évaluation de la Performance Industrielle : Modèle d'indicateur et Techniques Floues pour un Pilotage Réactif, Thèse de doctorat de 3<sup>ème</sup> cycle, I.N.P.G., Septembre 1997
- [Berry et al. 1987] G.Berry, P.Couronne, G.Gonthier, Programmation synchrone des systèmes réactifs: le langage ESTEREL, T.S.I. 0752-4072/87/04/305-12
- [Bézivin et al. 2001] J.Bézivin, O.Gerbé, Towards a Precise Definition of the OMG/MDA Framework, ASE'01, Novembre 2001.
- [Bjorner et al. 1998] N.Bjorner, Z.Manna, H.Sipma, T.Uribe, Deductive Verification of Real-Time Systems Using STeP, Technical Report STAN-CS-TR-98-1616, Computer Science Department, Stanford University, 1998
- [Bock et al. 2004] C.Bock, M.Gruninger, PSL: A Semantic Domain for Flow Models, Software and Systems Modelling Journal, 2004
- [Bonnetfous et al. 2001] C.Bonnetfous, A.Courtois editeurs, Indicateurs de performance, Traité IC2, 2001, Hermès
- [Booch et al. 1999] G.Booch, J.Rumbaugh, I.Jacobson, The Unified Modelling Language User Guide. Addison-Wesley, 1999
- [Boullier et al. 2002] M.Boullier, L.Geoffray, E.Le Gouzouguec, B.Masson, Le Livre Blanc du BPM : L'orchestration des processus métiers, Vistali, 2002
- [BPMN 2003] Business Process Modeling Notation, Business Process Management Initiative (BPMI), Working Draft (1.0) August 25, 2003
- [Braesch et al. 1995] C.Braesch, A.Haurat (sous la direction de), La modélisation systémique en entreprise, Ouvrage collectif, Pôle Productique Rhône-Alpes, Hermès, 1995
- [Braesch et al. 2003] C.Braesch, L.Blanc dit Jolicoeur, Un modèle pour l'intégration et le pilotage des processus métiers de l'entreprise, GDR MACS Groupe ERP, Lyon 28 novembre 2003.
- [Budkowski 1997] S.Budkowski, P.Dembinski, M.Diaz, ISO Standardized description technique ESTELLE (accessible via la page du projet IDEMCOP à l'adresse <http://www-lor.int-evry.fr/idemcop>, voir aussi l'environnement de développement d'Estelle sur <http://www-lor.int-evry.fr/edt/>
- [C4SR 1997] C4ISR Architecture Framework, Version 2.0, Décembre 1997
- [Cabral et al. 2006] R.Cabral, G.Doumeingts, L.Li, K.Popplewell (editors), Enterprise Interoperability Research Roadmap, Working document, Version 3.0, 6 June 2006
- [Canuto et al. 1998] E.Canuto, F.Donati, M.Vallauri, Manufacturing algebra: a new mathematical tool for discrete-event modelling of manufacturing systems, Systems: theory and practice, Advances in computing sciences, R.Albrecht editor, Springer Wien New-York, pp 269 to 312, 1998
- [CAS 2003] Casualty Actuarial Society (CAS), Overview on Enterprise Risk Management, ERM Committee, 2003
- [Chatel et al. 2004] V.Chatel, C.Feliot, Principe de conception système certifiée par la preuve, Journées Francophones des Langages Applicatifs, JFLA 2004
- [Chein et al. 1992] M Chein, M-L Mugnier, Conceptual graphs: fundamental notions, Revue d'intelligence artificielle, vol.6, n°4, pages 365- 406, 1992
- [Chen et al. 2002 a] D.Chen, B.Vallespir, G.Doumeingts, Developing an Unified Enterprise Modeling Language (UEML) - Roadmap and Requirements, 3rd IFIP Working Conference on Infrastructures for Virtual Enterprise, Collaborative Business Ecosystems and Virtual Enterprises, Kluwer Academic Publishers, ISBN 1-4020-7020-9, Sesimbra, Portugal, 2002
- [Chen et al. 2002 b] D.Chen, B.Vallespir, G.Doumeingts, Designing Manufacturing Systems: Contribution to the development of an Enterprise Engineering Methodology (EEM) within the frame of GERAM, IFAC'2002 World Congress, Barcelona, Spain, 2002
- [Chen et al. 2003] D.Chen, F.Vernadat, Enterprise interoperability: a standardization view, Handbook on architectures of information systems, Springer, 2003
- [Chen et al. 2004] D.Chen, F.Vernadat, Standards on enterprise integration and engineering – A state of the art, In International Journal of Computer Integrated Manufacturing (IJCIM), Volume 17, n°3, April-May 2004, pp.235-253

- [Chorafas 2002] D.N.Chorafas, Enterprise Architecture and new generation Information Systems, Information Technology coll., St. Lucie press, 2002
- [CNOMO 1987] CNOMO, E41.50.520.N, Moyens de production- Agrément- Fiabilité- Maintenabilité- Disponibilité- Temps d'état d'un moyen Définition, novembre 1987, document électronique (voir aussi <http://www.cnomo.com/>)
- [Cook et al. 2005] D.A.Cook, J.M.Skinner, How to perform credible verification, validation and accreditation for modelling and simulation, Crosstalk Journal of Dfenese Sotware Engineering, 2005
- [COQ 2005] The Coq Proof Assistant - Reference Manual, Version 8.0, Janvier 2005 (voir <http://coq.inria.fr/>)
- [CORE 2005] CORE: System engineering guided tour, Vitech corporation (voir <http://www.vitechcorp.com/>), 2005
- [Daclin et al. 2005] N.Daclin, D.Chen, B.Vallespir, Développement de l'interopérabilité des applications de gestion industrielles : concepts de base et définitions, 6e Congrès international de génie industriel, 7-10 juin 2005, Besançon (France)
- [Darras et al. 2002] F.Darras, F.Gaborit, H.Pingaud, Une analyse du besoin pour le déploiement d'un ERP en PME/PMI, 15ème Conférence Internationale Software & Systems Engineering and their Applications (ICSSEA), vol. 1, Paris, 3-5 décembre 2002
- [David et al. 1989] R.David, H.Halla, Du Grafset aux Réseaux de Petri, Editions Hermes, 1989
- [Derrick et al. 1995] E.J.Derrick, O.Balci, A visual simulation support environment based on the Domino conceptual framework, Journal of Systems and Software, vol 31, Issue2, Décembre 1995
- [Diallo 2000] D.Diallo, Assistance à la validation par paraphrasage de spécifications formelles écrites en B, Thèse de Doctorat de l'Université de Nantes, 2000
- [Dindeleux et al. 1998] R.Dindeleux, L.Berrah, A.Haurat, Formal modelling of control processes, European journal of operational research, 109 pp. 377 to 389, 1998
- [DIS 2002] EN/DIS Language Construct for enterprise modeling, EN/DIS 19440, CEN/TC 310/WG 1 Systems architecture (2002)
- [Donati et al. 1997] F.Donati, E.Canuto, M.Vallauri, Advances in manufacturing algebra: discrete-event dynamic models of production processes, IFAC Manufacturing System: Modelling, Management and Control, Vienna, Austria, 1997
- [Douglas 1977] D.T. Ross, Structured Analysis SA: a language for communicating ideas .IEEE transactions of software engineering. SE-3 (1): 16-34, January 1977
- [Doumeingts 1984] G.Doumeingts, Méthode GRAI : méthode de conception des systèmes productique, Thèse d'état de l'Université Bordeaux 1, France, 1984
- [Doumeingts et al. 1998] G.Doumeingts, B.Vallespir, D.Chen, GRAI Grid Decisional Modeling, Handbook on architectures of information systems, Bernus, P., Mertins, K. and Schmidt, G. Editors, International Handbooks on Information Systems, Springer, 1998
- [Dubois et al. 1994] E.Dubois, M. Petit, Using a formal declarative language for specifying requirements modelled in CIMOSA in Integrated Manufacturing Systems Engineering, P.Ladet and F.Vernadat Eds., Chapman & Hall, London, 1994
- [Dubois et al.1998] E.Dubois, P.Dubois, Albert II: une approche à la conception de cahiers de charges pour des systèmes réactifs et coopératifs, Techniques et Sciences Informatique (TSI), vol. 17, no 2, Février 1998
- [Ducq et al. 2005] ] Y.Ducq, J.Deschamps, B.Vallespir, Re-engineering d'un système hospitalier par l'utilisation de la méthodologie GRAI, Journal européen des systèmes automatisés RS série JESA Vol. 39 N°5-6, 2005
- [Durand 2004] D.Durand, La Systémique, Editions Que sais-je?; Presses Universitaires de France, 2004
- [Dwyer et al. 1999] M.B.Dwyer, G.S.Avrudin, J.C.CorbettPatterns, Property Specifications for Finite-state Verification, Proceedings of the 21st International Conference on Software Engineering, May, 1999 (voir le site en ligne <http://patterns.projects.cis.ksu.edu/>)

- [Easterbrook 2002] S.Easterbrook, An Introduction to Formal Modeling in Requirements Engineering, 10th Joint International Requirements Engineering Conference, in Essen, Germany, Septembre 2002
- [EICTA 2004] EICTA Interoperability white paper, 2004 (voir [www.etsi.org/sos\\_interoperability/Background\\_papers/EICTA\\_white\\_paper\\_on\\_interoperability.pdf](http://www.etsi.org/sos_interoperability/Background_papers/EICTA_white_paper_on_interoperability.pdf))
- [El Mhamedi et al. 1998] A. El Mhamedi; F. Vernadat, The ACNOS approach for performance evaluation of enterprise processes and activities, In: Proc. 9th IFAC Symp. on Information Control in Manufacturing (INCOM'98), Nancy-Metz, France, June 1998, Vol. 3, pages 263-268, 1998.
- [El Rhalibi et al. 1995] A.El Rhalibi et al., From modelling using Function Chart For Control Systems to analysis using Petri Nets, MASCOT'95 International Workshop on modelling, analysis and simulation of computer, Durham North Carolina USA, January 18/20 1995
- [Emerson 1990] E.Emerson, Temporal and modal logic, Handbook of Theoretical Computer Science, vol. B. MIT Press. Editeur: J. van Leeuwen ISBN 0262220393, pp. 955-1072
- [Epstein et al. 2002] R.M.Epstein, E.M.Hundert, Defining and Assessing Professional Competence, The Journal of the American Medical Association (JAMA), pages 226-235, 2002
- [Faure et al. 2001] J-M.Faure, L-J.Lesage, Methods for safe control systems design and implementation, 10th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing, INCOM'2001, Vienna (Austria), Septembre 2001
- [Feliot 1997] C.Feliot, Modélisation de systèmes complexes : intégration et formalisation de modèles, Thèse de l'Université Lille I, 1997
- [Fox 1992] M.S.Fox, The TOVE Project: A Common-sense Model of the Enterprise, Industrial and Engineering Applications of Artificial Intelligence and Expert Systems, Belli, F. and Radermacher, F.J. (Eds.), Lecture Notes in Artificial Intelligence # 604, Berlin: Springer-Verlag, pp. 25-34, 1992
- [Fox et al. 1998] M.S.Fox, M.Barbuceanu, M.Gruninger, J.Lin, An Organisation Ontology for Enterprise Modeling", In Simulating Organizations: Computational Models of Institutions and Groups, M. Prietula, K. Carley & L. Gasser (Eds), Menlo Park CA: AAAI/MIT Press, pp131-152, 1998
- [Fox et al.1997] M.S.Fox, M.Gruninger, On Ontologies and Enterprise Modelling", International Conference on Enterprise Integration Modelling Technology 97, Springer-Verlag, 1997
- [Garavel 1990] H.Garavel, Caesar Reference Manual, version 3.7 (disponible sur <http://www.inrialpes.fr/vasy/Publications/Garavel-90-a.html>)
- [Garavel et al. 2001] H.Garavel, F.Lang, R.Mateescu, An overview of CADP 2001, Rapport INRIA n°0254, 2005
- [Genelot 1998] D.Genelot, Manager dans la complexité, Edition INSEP Consulting, 1998
- [Genest 2000] D.Genest, Extension du modèle des graphes conceptuels pour la recherche d'informations, Thèse de doctorat de l'Université de Montpellier 2, Décembre 2000
- [Genest 2003] D.Genest, CoGITaNT Version-5.1 : Manuel de référence (accessible à l'adresse <http://cogitant.sourceforge.net>), 2003
- [GERAM 1999] GERAM: Generalised Enterprise Reference Architecture and Methodology Version 1.6.1, IFIP-IFAC Task Force on Architectures for Enterprise Integration, 1999
- [Giaccone 1991] T.Giaccone, Modèle structuré de spécification, de conception et de mise au point de systèmes à événements discrets, Thèse de Doctorat de l'université Montpellier II, 1991
- [GME 2004] GME Generic Modeling Environment (GME) version 4 User's Manual, Release 4-2-3, Institute for Software Integrated Systems (ISIS) Vanderbilt University, 2004
- [Grandhaye et al. 2004] J-P.Grandhaye, A.Rakotondranaivo, Modélisation et performance des réseaux de santé. Contribution à la prise en charge des patients. Journal européen des systèmes automatisés, Production de soins et logistique hospitalière, volume 38 n°6/2004, Hermes, Lavoisier

- [Greasley 2000] A.Greasley, Effective uses of business process simulation, Proceedings of the 2000 Winter Simulation Conference, J. A. Joines, R. R. Barton, K. Kang, and P. A. Fishwick, eds.
- [GRP 1999] Groupement de Recherche en Productique (GRP), La Modélisation d'Entreprise : le point de vue productique, Version 1.1, Mai 1999, Document de référence du GT5 "Modélisation d'Entreprise"
- [Gruber 1993] T.Gruber, Towards Principles for Design of Ontologies Used for Knowledge Sharing, Tech Report KSL93 -04, Stanford Knowledge Systems Laboratory, 1993 (document accessible à l'adresse [http://www-ksl.stanford.edu/KSL\\_Abstracts/KSL-93-04.html](http://www-ksl.stanford.edu/KSL_Abstracts/KSL-93-04.html))
- [Gruninger 1996] M.Gruninger, Designing and Evaluating Generic Ontologies, Proceedings of the Workshop on Ontological Engineering, European Conference on Artificial Intelligence, Budapest, 1996, pp. 53-65
- [Habrias 1993] H.Habrias, Introduction à la spécification, Editions Masson, 1993
- [Hamri 2004] M.Hamri, Utilisation de Arena pour la simulation des modèles spécifiés avec CommonKADS, Congrès MajecSTIC'03, 13 au 15 octobre 2004, Calais
- [Harel 1987] D.Harel, Statecharts: A Visual Formalism For Complex Systems, Sciences et Computer programming, 1987
- [Hart et al.1996] T.Hart, F.Linn, R.Morello, G.Royle, P.Kearney, P.Lindsay, K.Ross, O.Traynor, Formal Methods Pilot Project, SVRC Technical Report 96-17 , 1996
- [Hartmanis et al.1966] J.Hartmanis, R.E.Stearns, Algebraic Structure Theory of Sequential Machines; Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1966
- [Harzallah 2000] M.Harzallah, Modélisation des Aspects Organisationnels pour la Réorganisation d'Entreprise Industrielles, Thèse de doctorat, Université de Metz, 2000
- [HAS 2004] Haute Autorité de Santé, Manuel d'accréditation des établissements de santé, 2<sup>ème</sup> procédure, septembre 2004
- [Haurat et al.1994] A.Haurat, F.Piard, H.Rotival, B.Schweyer, Le modèle OLYMPIOS, un outil d'analyse et de conception du système d'informations des entreprises manufacturières, Xième congrès INFORSID, AIX-en-Provence, 1994
- [Hilger et al. 1990] J.Hilger J., J-M.Proth, Production Management Language, IFAC'90, Tallinn, Russia, 1990
- [Hoare 2004] C.A.R. Hoare Communicating Sequential Processes (CSP), Juin 2004, (accessible en version électronique à l'adresse <http://www.usingcsp.com/>)
- [Hoenicke et al. 2005] J.Hoenicke1, P.Maier, Model-Checking of Specifications Integrating Processes, Data and Time, AVACS – Automatic Verification and Analysis of Complex Systems, Report n°5, Board of SFB/TR 14 Eds.
- [HOL 2005] The HOL System, Cambridge Research Center of SRI International, 2005 (voir <http://hol.sourceforge.net/>)
- [Hôpital 2007] Ministère de la Santé, de la famille et des personnes handicapées <http://sante-gouv.fr/hm/dossiers/hopital2007>.
- [Hutzler 2000] G. Hutzler, Du Jardin des Hasards aux jardins de Données : une approche artistique et multi-agent des interfaces homme / systèmes complexes, Thèse de doctorat, Université Paris 6, janvier 2000
- [Hwang et al. 2006] Y.F.Hwang, D.C.Rine, Verification framework and algorithms for integrating information distribution systems, Journal Information and Software Technologies, Elsevier (2006)
- [IEC 848] IEC 848, Preparation of Function Charts for Control Systems, IEC Editions, 1988
- [IEC 88] Norme CEI, Etablissement de diagrammes fonctionnels pour systèmes de commande, 1988
- [IEEE 1990] Standard Computer Dictionary: A Compilation of IEEE Standard Computer Glossaries, Institute of Electrical and Electronics Engineers, New York, 1990
- [Iglehart 1999] J.K.Iglehart, The american health care system: expenditures, New England Journal of Medicine, 1999, 340:70-6

- [INCOSE 2004] INCOSE, System Engineering (SE) Handbook Working Group, System Engineering Handbook, A « How To » Guide For All Engineers, 2004
- [ISA 1999] ISA Enterprise - Control system Integration, Instrument Society of America, Part 1, ISA-ds95.01, Draft 14, 1999
- [Isabelle 2005] T.Nipkow, L.C.Paulson, M.Wenzel, Isabelle: A Proof Assistant for Higher-Order Logic, Springer-Verlag, 2005 (voir aussi <http://www.cl.cam.ac.uk/Research/HVG/Isabelle/>)
- [ISO 19440] EN ISO/DIS 19440, Enterprise integration: Constructs of enterprise modelling, Draft version, Genève, 2004.
- [ISO 8402] ISO 8402: Quality management and quality assurance: Vocabulary, Second edition 1994-04-01, International Standard Organization, 1994
- [ISO 9074] ISO 9074 : Estelle Tutorial, 1997
- [ITU 2000] ITU Information technology, Open Distributed processing, Reference model, Enterprise Language, Telecommunication standardization sector of International Telecommunication Union, recommendation X.911, Draft 7, 2000
- [Jackson 1995] M.Jackson, Software Requirements & Specifications: A Lexicon of Practice, Principles and Prejudices. Addison-Wesley and ACM Press, 1995
- [Jackson 2001] D.Jackson, Lightweight Formal Methods, Proceedings of International Symposium of Formal Methods Europe, Berlin, Germany, March 12-16., 2001
- [Jagdev et al. 1995] H.S.Jagdev, J.Browne, P.Jordan, Verification and validation issues in manufacturing models, Computers in Industry n°25, pages 331-353, 1995
- [Jebali et al. 2005] A.Jebali, P.Ladet, A.B.Hadj-Alouane, Une méthode pour l'ordonnancement du bloc opératoire, Journal européen des systèmes automatisés, JESA Vol. 39 N°5-6, 2005
- [Jonhson 2006] C.W.Johnson, What are emergent properties and how do they affect the engineering of complex system?, Reliability Engineering and System Safety Journal, Elsevier, 2006
- [Kalfoglou et al. 2004] Y.Kalfoglou, M.Schorlemmer, Formal Support for Representing and Automating Semantic Interoperability, 1st European Semantic Web Symposium (ESWS'04), pages 45-61, Heraklion, 2004
- [Kaufmann et al. 2006] M.Kaufmann, J.S.Moore, ACL2 Reference Manual, Applicative Common Lisp, Department of Computer Sciences, University of Texas at Austin (voir la dernière version sous format hypertexte de 2006 en ligne sur <http://www.cs.utexas.edu/users/moore/acl2/v3-0/ACL2-TUTORIAL.html>)
- [Kelton et al. 2001] D.Kelton, D.A.Sadowski, R.P.Sadowski, Simulation with Arena, McGraw-Hill, 2001
- [Kervern 1995] G.Y.Kervern, Eléments fondamentaux des Cindyniques. Editions Economica, Paris, 1995
- [KIF 1998] Knowledge Interchange Format, draft, American National Standard (dpANS), NCITS.T2/986004, 1998 (document accessible à l'adresse <http://logic.stanford.edu/kif/dpans.html>)
- [King et al. 2000] S.King, J.Hammond, R.Chapman, A.Pryor, Is proof more cost-effective than testing? IEEE Transactions on Software engineering, Vol 26, N°8, August 2000
- [Kohavi 1978] Z.Kohavi, Switching and Finite Automata Theory; Tata McGraw Hill, Computer Science Series, 1978
- [Kosanke et al. 1997] K.Kosanke, J-G.Nell (éditeurs), Enterprise Engineering and Integration - Building International Consensus: Proceeding of Iceimt '97, International Conference on Enterprise Integration and Modeling Technology, Torino, Italy, October 28-30, 1997
- [Kosanke et al. 2003] K.Kosanke, R.Jochem, J.G.Nell, A.Ortiz Bas, Enterprise Inter and Intra-organisational Integration - Building an International Consensus, Kluwer Academic Publishers, 2003, ISBN 1-4020-7277-5, 2003
- [Koubarakis et al. 2002] M.Koubarakis, D.Plexousakis, A formal framework for business process modelling and design, Information System Journal, n°27, pp 299-319, Pergamon Press, 2002
- [L'Her et al. 1995] D.L'Her, P.Le Parc, L.Marcé, Modeling and proving Grafscets with Transition Systems, 2nd AMAST Workshop on Real-Time Systems, Bordeaux, Juin 1995

- [Lamboley 2001] P.Lamboley, Proposition d'une méthode formelle d'automatisation de systèmes de production à l'aide de la méthode B, PhD Thesis University Henri Poincaré Nancy I, 2001
- [Lamine 2001] E.Lamine, Définition d'un modèle de propriété et proposition d'un langage de spécification associé : LUSP, Thèse de Doctorat Université Montpellier II, 2001
- [Le Moigne 1990] J-L.Le Moigne, La modélisation des systèmes complexes, Paris, Bordas, Dunot, 1990
- [Le Parc 94] P.Le Parc, Apports de la méthodologie synchrone pour la définition et l'utilisation du langage GRAFCET, Thèse de Doctorat Rennes 1, Janvier 1994
- [Le Parc et al. 93] P. Le Parc, L.Marcé, Synchronous definition of GRAFCET with Signal, IEEE/SMC'93, Le Touquet, Octobre 1993
- [Leape 2002] L.L.Leape, Reporting of adverse events, New England Journal of Medicine, 2002, 347 : 1 933-8
- [Leymonerie 2004] Leymonerie F., Blanc Dit Jolicoeur L., Cîmpan S., Braesch C., Oquendo F. (2004) Towards a business process formalization based on an architecture centered approach, ICEIS 2004, Portugal
- [Love et al. 2000] G.Love, G.Back, Model Verification and Validation for Rapidly Developed Simulation Models: Balancing Cost and Theory, white paper of the Project Performance Corporation (<http://www.ppc.com/>), 2000
- [Maggiolo-Schettini et al. 1996] A.Maggiolo-Schettini, A.Peron, S.Tini, Equivalences of Statecharts, International Conference on Concurrency Theory, 1996
- [Magnier 1990] J.Magnier, Représentation Symbolique et Vérification formelle de machines séquentielles, Thèse d'Etat Montpellier II, 1990
- [Mann 2002] Mann D. Hands on systematic innovation, CREAX Press Editor, 2002
- [Manna 1982] Z.Manna, A.Pnueli, How to cook a temporal proof system for your pet language, Report n°STAN-CS-82-954 Department of Computer Sciences - Stanford University, 1982
- [Manna et al. 1992] Z.Manna, P.Pnuelli, The Temporal Logic of Reactive and Concurrent Systems, Springer-Verlag, Berlin, 1992
- [Mansar et al. 2005] S.L.Mansar, H.A.Reijers, Best practices in business process redesign: validation of a redesign framework, Journal Computers in Industry, n°56, pages 457 à 471, (2005)
- [Marty 1994] J-C.Marty, Utilisation des Statecharts pour une spécification structurée du contrôle des cellules flexibles, Thèse de Doctorat Université Toulouse, 1994
- [Mateescu 1998] R.Mateescu, Vérification des propriétés temporelles des programmes parallèles, Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, avril, 1998
- [Mayer 1995] F.Mayer, Contribution au Génie Productique : Application à l'ingénierie pédagogique en Atelier Inter établissements de Productique Lorrain, Thèse de doctorat en production automatisée, Université Henri Poincaré/Nancy I, 1995
- [McCune 2003] W.McCune, OTTER 3.3 Reference Manual, ANL/MCS-Technical Memorandum n°263, Mathematics and Computer Science Division, 2 003
- [McGovern et al. 2003] J.McGovern, S.W.Ambler, M.E.Stevens, J.Linn, V.Sharan, E.K.Jo, A practical guide to Enterprise architecture, The coast series, Porentice Hall, 2003
- [McMilan 2000] K.L.McMilan, The SMV System for SMV Version 2.5.4: SMV Manual (see <http://www-2.cs.cmu.edu/~modelcheck/smv.html>), 2000
- [MDA 2001] MDA, Model Driven Architecture (MDA), Architecture Board ORMSC, Joaquin Miller and Jishnu Mukerji Eds., 2001
- [Meinadier 1998] J-P.Meinadier, Ingénierie et intégration des systèmes, Coll. Etudes et Logiciels Informatiques, Editions Hermès, 1998
- [Menzel et al. 1998] C.P.Menzel, R.J.Mayer, The IDEF Family of Languages in Handbook on architectures of information systems, Bernus P., Mertins K. et Schmidt G. Editeurs, Berlin, Springer, 1998

- [Mertins et al. 1995] K.Mertins, H.Hedeler, R.Jochem, J.Hofmann, Objects Oriented modeling and analysis of business processes, Integrated Manufacturing Systems Engineering, (editors) P.Ladet/Vernadat, Londres, 1995
- [Milner 1991] R.Milner, The Polyadic Pi-Calculus : a tutorial (la version de 1991 est accessible à l'adresse <http://www.lfcs.inf.ed.ac.uk/reports/91/ECS-LFCS-91-180/>)
- [Moalla 1981] M.Moalla, Spécification et conception sûre d'automatismes discrets complexes, basés sur l'utilisation du GRAFCET et des Réseaux de Petri, Thèse de Doctorat Grenoble, Juillet 1981
- [Molina et al. 2004] A.Molina, H.Panetto, D.Chen, F.Vernadat, L.Whitman, Enterprise Integration and networking: Milestone Report, TC 5.3 Enterprise Integration and Networking, ICEIMT2004 proceedings, International Conference on Enterprise Integration and Modeling Technology, Canada, 2004
- [Moncelet 1998] G.Moncelet, Application des réseaux de Petri à l'évaluation de la sûreté de fonctionnement des systèmes mécatroniques du monde automobile, Thèse de doctorat de l'Université Paul Sabatier, octobre 1998
- [Montmain et al. 2006] J.Montmain, J-M. Penalva, V.Chapurlat, A-L.Courbis, B.Vayssade, M.Vinches, le management du risque, Rapport interne, Audit Risque du 21 Juin 2006
- [Morel et al. 2001] G.Morel, J-F.Petin, P.Lamboley, Formal specification for manufacturing systems automation, 10th IFAC INCOM Symposium, Sept.20-22, 2001, Vienne, Autriche
- [Morin 1990] E.Morin, La Méthode (tome3) : La Connaissance de la Connaissance, Le Seuil. Édition de poche, collection "Points", 1990
- [Mougin 2002] Y.Mougin, La cartographie des processus: Maîtriser les interfaces, Editions d'organisation, 2002
- [Mounier 1994] Y.D.Mounier, L'intégration d'une application informatique dans un monde d'échanges ouverts - EDI Europe, volume 4 – n4, p329 à 357, 1994
- [Mylopoulos et al. 1990] J.Mylopoulos, A.Borgida, M.Jarke, M.Koubarakis, Telos: A Language for Representing Knowledge about Information Systems, ACM Trans. Information Systems, volume 8, n°4, 1990, pp. 325-362
- [NASA 1998] NASA Formal Methods Specification and Analysis Guidebook for the Verification of Software and Computer Systems, Volume II: A Practitioner's Companion (voir la version de 1998 à l'adresse [http://eis.jpl.nasa.gov/quality/Formal\\_Methods/document/NASA\\_gb2.pdf](http://eis.jpl.nasa.gov/quality/Formal_Methods/document/NASA_gb2.pdf))
- [NASA 2001] NASA, VV&A Recommended Practices Guide - Glossary, 2001
- [Nicolet 1999] J-L.Nicolet, Vaches folles et hyper espace des dangers, Albi, Ecole d'été "Gestion Scientifique du risque", 6/10 septembre 1999
- [Nijssen et al 1989] G.M.Nijssen, T.Halpin, Conceptual Schema and Relational Database Design, Prentice Hall, Sydney, 1989
- [NIST 2002] NIST Process Specification Language (see <http://ats.nist.gov/psl/>), 2002
- [OMG 2004] Object Management Group (OMG) web site (voir les articles et documents de référence sur UML, le MDA et d'autres travaux relatifs à l'adresse <http://www.omg.org/>), 2004
- [O'Rourke et al. 2003] C.O'Rourke, N.Fishman, W.Selkow, Enterprise Architecture : Using the Zachman Framework, Thomson course Technology, 2003
- [Oryx 2003] Choix d'outils de modélisation de processus, Version 2, Février 2003 (accessible à l'adresse <http://www.oryx-si.com>)
- [OWL 2004] Ontology Web Language overview, W3C Recommendations, Février 2004 (voir le site <http://www.w3.org/TR/owl-features/>)
- [Owre et al. 2001] S.Owre, N.Shankar, J.M.Rushby, D.W.J.Stringer-Calvert, PVS Language Reference, Version 2.4, Computer Sciences Laboratory, SRI International (see <http://pvs.csl.sri.com/>), 2001
- [Pearl 1999] J.Pearl, Reasoning With Cause and Effect, International Joint Conference on Artificial Intelligence, Morgan Kaufmann, San Francisco, USA, 1999
- [Pearl 2000] J.Pearl, Causality: Models, Reasoning, and Inference, Cambridge University Press, 2000

- [Penalva 1997] J-M.Penalva, La modélisation par les systèmes en situation complexe, Thèse de Doctorat de l'Université de Paris Sud, 1997
- [PERA 2001] Purdue Enterprise Reference Architecture (PERA), A handbook on master planning and implementation for enterprise integration programs based on the Purdue Enterprise Reference Architecture (PERA) and the Purdue Methodology, Purdue Laboratory for Applied Industrial Control, Theodore J. Williams, Gary A. Rathwell and Hong Li editors, 2001
- [Perilhon 2003] P.Perilhon, MOSAR: présentation de la méthode, Techniques de l'Ingénieur, traité Sécurité et gestion des risques, 2003
- [Petit 1999] M.Petit, Formal requirements engineering of manufacturing systems: a multi-formalism and component-based approach, Thèse de doctorat de l'Université de Namur, Belgique, Octobre 1999
- [Petit et al. 1997] M.Petit, E. Dubois, Defining an ontology for the formal requirements engineering of manufacturing systems, in Enterprise engineering and Integration: Building international consensus (K.Kosanke and J.Nell Eds.), Springer Verlag, Berlin, 1997
- [Petit et al. 2002] M.Petit, G.Doumeings, Enterprise Modelling State of the Art, Deliverable D1.1 of the UEML Project, Unified Enterprise Modelling Language UEML Thematic Network, IST-2001-34229 ([www.ueml.org](http://www.ueml.org)), 2002
- [Pietrac 1999] L.Pietrac, Apport de la méta-modélisation formelle pour la conception des systèmes automatisés de production, Thèse de Doctorat de l'Ecole Normale Supérieure de Cachan, 12 janv. 1999, LURPA-Ens de Cachan
- [Planchon 1997] Serge Planchon, Interconnection et Décomposition de Machines Séquentielles Interprétées, DEA Université Montpellier II
- [Pnueli et al. 1995] M.S.Pnueli, What is in a Step? On the semantics of Statecharts, The Weizmann Institute of Sciences, 1995
- [Popkin 2003] Popkin, Enterprise modeling: Aligning Business and Information Technology, White paper, Popkin Software ([http://www.popkin.com/customers/customer\\_service\\_center/downloads/whitepaper/index.htm](http://www.popkin.com/customers/customer_service_center/downloads/whitepaper/index.htm)), 2003
- [Pourcel et al.2005] C.Pourcel, D.Gourc, Modélisation d'entreprise par les Processus : Activités, Organisation et Application, Editions Cépaduès, 2005
- [Quillian 1968] M.R.Quillian, Semantic Memory, Semantic Information Processing, The MIT Press, Minsky (éditeur), Cambridge, pp. 227-270, 1968
- [Ratikin 2001] S.R.Ratikin, Software Verification and Validation for Practitioners and Managers. Artech House Publishers, 2001
- [Revelle 2002] J.B.Revelle, Manufacturing handbook of best practices: an innovation, productivity and quality focus, APICS series on resource management, JB.Revelle editor, St. Lucie Press, 2002
- [Roboam 1993] M.Rodoam, La méthode GRAI : Principes, Outils, Démarche et Pratique, Tecknéa 1993
- [Rodde 1989] G.Rodde, Les systèmes de production : modélisation et performances, Editions Hermès, 1989
- [Roussel 1994] J-M.Roussel, Analyse de Grafcet par Génération Logique d'Automates Equivalents, Thèse de Doctorat de l'ENS Cachan, 1994
- [Roussel et al. 2004] J-M.Roussel, J-M.Faure, J-J.Lesage, A.Medina, An algebraic approach for dependable logic control systems design. International Journal of Production Research; vol. 42, n° 14, pp: 2859-2876, July 2004
- [Roux et al. 1994] O.Roux, V.Rusu, Du GRAFCET au langage réactif asynchrone ELECTRE, APII Edition Hermès, Vol 28 n°2, 1994
- [RPG 2001] RPG, V&V Techniques, RPG reference Document (accessible à l'adresse <http://vva.dmsomil/>), DMSO (Defence Modelling and Simulation Office), 2001
- [Sagace 1999] Méthode SAGACE: le systémographe, CEA, Version 1.0, 1999
- [Saaltink 1999] M.Saaltink, The Z/EVES 2.0 User's Guide, TR-99-5493-06a (accessible à l'adresse <http://www.ora.on.ca/z-eves/>), 1999

- [Sami 2005] E.Sami, Helena 1.0.4 user's guide, CNAM Paris, 2005 (accessible à l'adresse <http://helena.cnam.fr/>)
- [Schekkerman 2003] J.Schekkerman, Enterprise Architecture Validation, Achieving Business-Aligned and Validated Enterprise Architectures Institute For Enterprise Architecture Developments Report, 2003
- [Schlenoff et al. 2000] C.Schlenoff, M.Gruninger, F.Tissot, J.Valois, J.Lubell, J.Lee, The Process Specification Language (PSL): Overview and Version 1.0 Specification, NISTIR 6459, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, 2000, (document accessible avec beaucoup d'autres sur PSL à l'adresse <http://www.mel.nist.gov/psl/pubs.html>)
- [Sekkerman 2003] J.Sekkerman, Extended Enterprise Architecture Maturity Model (E2AMM), 2003
- [Sheer 1998] Scheer A.-W. ARIS, Business Process Frameworks (Second edition), Springer-Verlag, 1998
- [Smith 2000] G.Smith, The Object-Z Specification Language. Advances in Formal Methods. Kluwer Academic Publishers, 2000 (ISBN 0-7923-8684-1)
- [Sowa 1984] J.F.Sowa, Conceptual structures: information processing in mind and machine, New York (U.S.A.): Addison-Wesley, 1984
- [Sowa et al. 1992] J.F.Sowa, J.A.Zachman, Extending and Formalising the Framework for Information Systems Architecture, IBM Systems Journal, volume 31, n°3, pages 590 – 616, 1992
- [SPIN 2005] The SPIN Primer and Reference Manual, Addison Wesley, ISBN 0-321-22862-6 (voir aussi <http://spinroot.com/spin/whatispin.html>), 2005
- [Spivey 1992] J.M.Spivey, The Z notation: a reference manual (2nd edition), Prentice Hall International, 1992
- [Stegwee et al. 2004] R.A.Stegwee, B.D.Rukanova, Identification of different types of standards for domain specific Interoperability, Standard Making: A Critical Research Frontier for Information Systems, MISQ Special Issue Workshop, 2004
- [STEP 1996] Stanford TEmporal Prover (voir le site <http://www-step.stanford.edu/>), version de 1996
- [Swoogle 2006] il s'agit d'un automate de recherche d'ontologies et permettant d'accéder à nombre d'ontologies existantes (accessible à l'adresse <http://swoogle.umbc.edu/>)
- [Tae-Young et al. 2005] K.Tae-Young, L.Sunjae, K.Kwangsoo, K.Cheol-Han, A modelling framework for agile and interoperable virtual enterprises, Journal Computers in Industry, 2006
- [Tixier 2000] J.Tixier, G.Dusserre, Review of 62 risk analysis methodologies of industrial plants, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2000
- [Touzi et al. 2006] J.Touzi, F.Benaben, H.Pingaud, Interopérabilité et Système d'Information: aide à la conception de système d'information inter-organisationnels à partir de processus collaboratifs, Numéro spécial ISI 'Ingénierie des Systèmes d'Information', Ingénierie des processus et systèmes d'information, K.Benali/V.Chapurlat editeurs, Septembre 2006
- [UEML 2003] Deliverable D3.1: Requirements analysis: initial core constructs and architecture, Unified Enterprise Modeling Language UEML Thematic Network - IST-2001-34229 ([www.ueml.org](http://www.ueml.org)), 2003
- [Uschold et al. 1996] M.Uschold, M.Gruninger, Ontologies: Principles, Methods and Applications, Knowledge Engineering Review, vol.11:2, pp. 93-136, 1996
- [UTE 93] Norme UTE C03-191 F, Diagramme fonctionnel GRAFCET : Extension des concepts de base, 1993
- [Vallespir 2003] B.Vallespir, Modélisation d'entreprise et architectures de conduite des systèmes de production, Habilitation à Diriger des Recherches, Université Bordeaux 1, 19 Décembre 2003
- [Van der Aalst 2000] W.M.P. Van der Aalst, Workflow Verification: Finding Control-Flow Errors Using Petri-Nets-Based Techniques, Business Process Management: Models, techniques and Empirical Studies, W. Van der Aalst, J. Desel, A. Oberweis (Eds.), Springer, 2000

- [Van Lamsweerde 2002] A.Van Lamsweerde, Formal Specification: a Roadmap, The Future of Software Engineering, A. Finkelstein (ed.), ACM Press, 2002
- [Vandermeulen 1996] E.Vandermeulen, La Machine Séquentielle Interprétée : Un modèle à états pour la représentation discrète et la vérification de systèmes, Thèse de Doctorat Université Montpellier II, 1996
- [VDM 1996] Vienna Development Method: Specification Language (VDM-SL), Part1: Base language, Internat. Standard ISO/IEC 13817-1, 1996
- [Vernadat 1996] F.B.Vernadat, Enterprise Modelling and Integration: Principles and Applications, Chapman & Hall, 1996
- [Vernadat 2001] F.B.Vernadat, UEML: Towards a Unified Enterprise Modeling Language. Proc. 3ème Conférence Francophone de Modélisation et Simulation (MOSI-M'01), Troyes, France, 2001
- [Vernadat 2002] F.B.Vernadat, Enterprise Modelling and Integration (EMI): Current Status and Research Perspectives, Annual Reviews in Control 26, p15-25, 2002
- [Volker et al. 2002] N.Völker, B.J.Krämer, Automated verification of function block-based industrial control systems, Science of Computer Programming, Volume 42, Issue 1, Janvier 2002, Pages 101-113
- [Williams 1992] T.J.Williams, The Purdue Enterprise Reference Architecture, Instrument Society of America, Research Triangle Park, North Carolina, 1992
- [Yahoda 2003] Formal verification tools overview web site (see <http://anna.fi.muni.cz/yahoda/>), 2003
- [Yergeau et al. 2004] F.Yergeau, T.Bray, J.Paoli, C.M.Sperberg-McQueen, E.Maler, Extensible Markup Language (XML) 1.0 (Third Edition), W3C Recommendation, 2004 (voir <http://www.w3.org/TR/2004/REC-xml-20040204/>)
- [Yovine 2002] S.Yovine, Kronos: A Verification tool for real time systems, User's Guide, 2002 (voir le site dédié à l'outil Kronos <http://www-verimag.imag.fr/TEMPORISE/kronos/>), 2002
- [Zachman 1987] J.A.Zachman, A framework for information systems architecture, IBM Systems Journal, vol. 26, no. 3, pp. 276-292,1987
- [Zanettin et al. 1992] M.Zanettin, G.Doumeingts, The GIM Method for CIM system analysis, International Institute for advanced Studies in System Research and Cybernetics, Baden-Baden, 1992

## **SYNTHESE DES RESULTATS**

L'activité de recherche s'est concrétisée par une politique et une action de publication, d'encadrement de travaux et une implication dans la communauté de recherche. Plusieurs prototypes et une activité de transfert vers l'industrie confortent enfin ces résultats.

### **A - PUBLICATIONS**

La Figure 55 synthétise l'action de publication<sup>29</sup> depuis 1991.

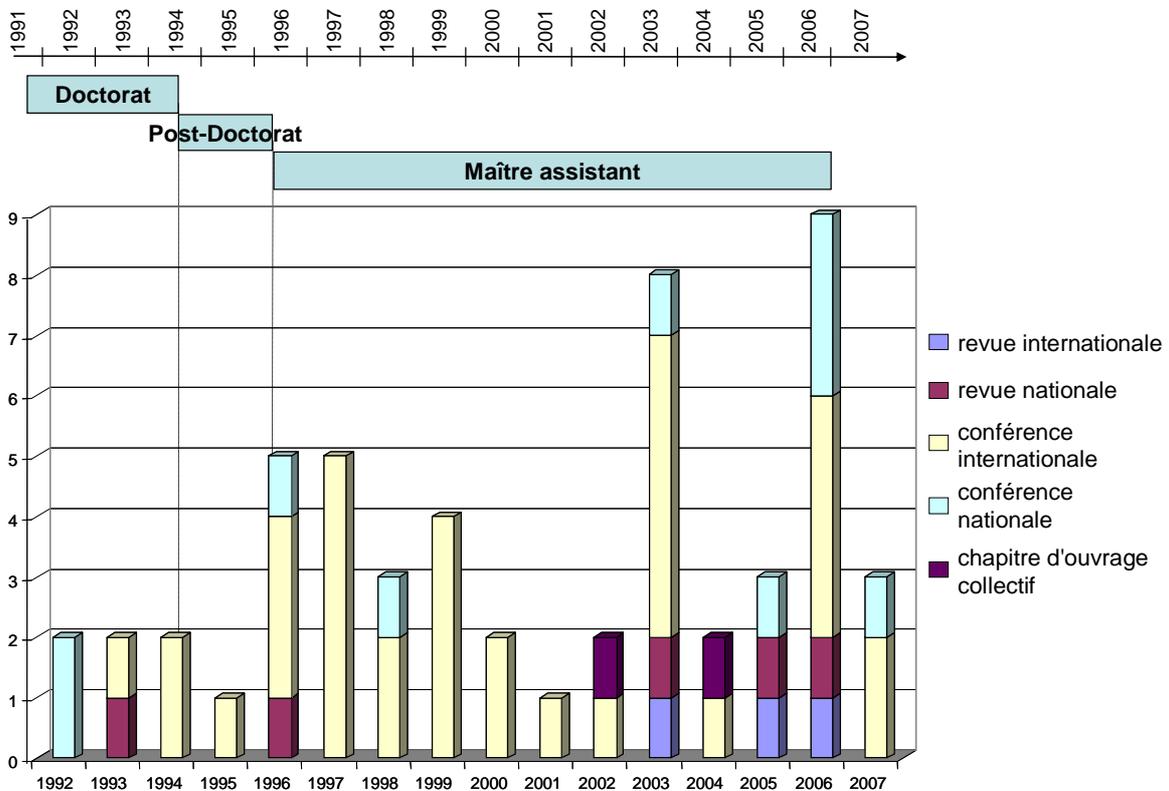


Figure 55 : Synthèse de l'activité de publication

<sup>29</sup> Cette figure ne comptabilise pas les rapports de recherche et de contrats dont les éléments essentiels sont listés plus loin.

Cette action se solde aujourd'hui par 57 publications dans divers cadres : 3 revues internationales, 5 revues nationales, 37 articles dans des conférences internationales avec comités de lecture, 10 articles dans des conférences nationales avec comité de lecture et enfin 2 chapitres dans des ouvrages collectifs à diffusion restreinte.

Le taux moyen de publication est de 3,56 publications chaque année.

Les articles précédés d'un astérisque (\*) sont joints en annexe A (page 136).

### **1 - MANUSCRIT DE THESE**

(MT) V. Chapurlat, ACSY-R: un modèle de spécification, conception et simulation de la commande de systèmes discrets complexes répartis, Thèse de Doctorat Université Montpellier II, Soutenue le 29 septembre 1994

### **2 - REVUES INTERNATIONALES AVEC COMITE DE LECTURE**

\*(RI1) B. Kamsu-Foguem, V.Chapurlat, Requirements Modelling and Formal Analysis using Graph Operations, IJPR International Journal of Production Research, TPRS vol 44 issue 17, pages 3451-3470, 2006

\*(RI2) V. Chapurlat, B. Kamsu-Foguem, F. Prunet, A Formal Verification Framework and Associated Tools for Enterprise Modeling: Application to UEML, Computers in Industry, n°57, pp 153-166, Septembre 2005

\*(RI3) V. Chapurlat, B. Kamsu-Foguem, F. Prunet, Enterprise model verification and validation: an approach, Annual Review in Control, Volume 27, Issue 2, pages 185-197, 2003

### **3 - REVUES NATIONALES AVEC COMITE DE LECTURE**

(RN1) R.Collomp, S.Aloui, V.Chapurlat, J.-M.Penalva, A.Mousnier, P.Staccini, J.-F.Quaranta, Pilotage de la performance par le biais du management des risques : application au circuit du médicament, Revue Logistique et Pilotage de la performance, à paraître, 2007

(RN2) V. Chapurlat, B. Kamsu-Foguem, F. Prunet, Vérification de modèles de processus d'entreprise : une approche formelle, JESA, Journal Européen des Systèmes Automatisés, Volume 39, n°9-10/2005, pages 1051 – 1078,

(RN3) C. Covès, D. Crestani, V. Chapurlat, F. Prunet, Estimation de performance de processus d'entreprise : la vue de l'ingénieur de production, Revue RIISPM, numéro 6, 2003

(RN4) V.Chapurlat, F.Prunet, Un modèle pour la spécification, la conception et la validation des Systèmes de Contrôle/Commande répartis : le modèle ACSY-R, APII, Hermes, Janvier 1996

(RN5) V.Chapurlat, G.Monneret, F.Pereyrol, F.Prunet, D.Simottel, A structured model for specification of discrete events systems: the ACSY model, APII numéro spécial 'Advances in GRAFCET' - Hermes - 1993 - p 65 à 80

#### 4 - CONFERENCES INTERNATIONALES AVEC ACTES ET COMITE DE LECTURE

- (CI1) V. Chapurlat, D. Diep, A. Kalogeras, J. Gialelis, Building and validating a Manufacturing Ontology to achieve Interoperability, I-ESA 2007, International Conference Interoperability of Enterprise Systems and Applications, 28-30 mars 2007, Medeira, Portugal
- (CI2) S.Aloui, V.Chapurlat, R.Collomp, J-M.Penalva, Enterprise modelling for Information System specification: application to drug circuit, International Conference on Industrial Engineering and Systems Management, IESM 2007, May 30 - June 2, 2007, Beijing, Chine
- (CI3) V.Chapurlat, C.Braesch, Verification, Validation and Accreditation of Enterprise Models, INCOM 2006, Proceedings volume from the 12th IFAC International Symposium on Information Control Problems in Manufacturing, St Etienne, France, 17-19 May 2006, A. Dolgui, G. Morel and C. Pereira Eds., ISBN: 978-0-08-044654-7, pages 597-603
- (CI4) S.Aloui, V.Chapurlat, J-M.Penalva, Linking interoperability and risk assessment: A methodological approach for socio-technical systems, INCOM 2006, Proceedings volume from the 12th IFAC International Symposium on Information Control Problems in Manufacturing, St Etienne, France, 17-19 May 2006, A. Dolgui, G. Morel and C. Pereira Eds., ISBN: 978-0-08-044654-7, pages 555-601
- (CI5) L. Ferrarini, C. Veber, A. Lüder, J. Peschke, A. Kalogeras, J. Gialelis, J. Rode, D. Wünsch, V. Chapurlat, Control Architecture for Reconfigurable Manufacturing Systems: the PABADIS'PROMISE approach, ETFA 2006
- (CI6) V.Chapurlat, S.Aloui, How to detect risks with a formal approach? From property specification to risk emergence, MSVVEIS 2006, Proceedings of Modeling, Simulation, Verification and Validation of Enterprise Information Systems, pages 134-147, Paphos, Cyprus, Mai 2006
- (CI7) V.Chapurlat, J.Montmain, D.Gharbi, A Proposition for Risk Analysis in Manufacturing and Enterprise Modeling, Proceedings of ICEIMT 2004: Knowledge sharing in the integrated enterprise: interoperability strategies for the enterprise architect, Toronto, 2004 Springer, Peter Bernus and Mark Fox editors, pages 183-193, Actes parus en 2005
- (CI8) V. Chapurlat, D. Crestani, Modélisation et analyse de processus opérationnels : Résultats d'une collaboration Industrie/Recherche, Congrès International de Génie Industriel GI2003, Québec, Canada, 26-29 octobre 2003
- (CI9) B.Kamsu Foguem, V.Chapurlat, F.Prunet Complex system properties representation and reasoning using the conceptual graphs, International Conference on Computational Intelligence for Modelling Control and Automation, CIMCA'2003, Vienne, Autriche, 12-14 février 2003
- (CI10) B. Kamsu Foguem, V. Chapurlat, F. Prunet, Enterprise model verification: a graph-based approach, Computing Engineering in Systems Applications, CESA 2003, Lille, 09 au 11 juillet 2003
- (CI11) B. Kamsu Foguem, V. Chapurlat, F. Prunet, Modélisation et analyse formelle des systèmes complexes avec les graphes conceptuels : application à la modélisation

d'entreprise, Conférence Canadienne en Génie Electrique et Informatique, CCGEI 2003, IEEE Canada, Montréal, 04 au 07 mai 2003

- (CI12) D.Gharbi, V.Chapurlat, J.Montmain, G.Grevy, G.Dusserre, Une approche composite d'analyse de risque : identification et résolution, 5ème Congrès International de Génie Industriel (GI2003), Québec, Canada, octobre 2003
- (CI13) V.Chapurlat, B.Kamsu-Foguem, F.Prunet, A property reference model and associated tools for system life-cycle management, 15ème World Congress IFAC, B'02 Barcelone, Juillet 2002
- (CI14) V.Chapurlat, E.Lamine J.Magnier, Modélisation et analyse de processus d'entreprise : une démarche autre que la simulation, Congrès de Génie Industriel GI2001 - Marseille/Aix en provence - Juin 2001
- (CI15) C.Covès, D.Crestani, V.Chapurlat, F.Prunet, Implementation of an approach of performance estimation for enterprise process analysis, IFAC/IFIP International Conference MCPL'2000, Grenoble, France
- (CI16) V.Chapurlat, E.Lamine, J.Magnier, Langage Unifié de Spécification de Propriétés pour l'analyse des systèmes industriels : LUSP (Unified Property Specification Language for industrial systems analysis), IFAC/IFIP International Conference MCPL'2000, Grenoble, France
- (CI17) E. Lamine, V. Chapurlat, M. Larnac, J. Magnier, Property model relevance for system performance evaluation, WMC'99, Durham, Angleterre, du 27 au 30 septembre 1999, pp 687-692
- (CI18) V. Chapurlat, E. Lamine, M. Larnac, J. Magnier, Relevance of Property concept for Enterprise processes analysis, IEMC'99, Verdal, Norvège, du 14 et 16 juin 1999
- (CI19) M. Larnac, J. Magnier, V. Chapurlat, Simplification of proof procedures based on the path condition concept, EUROCAST'99, Vienne, Autriche, du 29 septembre au 2 octobre 1999
- (CI20) V.Chapurlat, M.Larnac, E.Lamine, J.Magnier, Definition of a formal analysis framework for existing enterprise modelling approaches, ASI'99 - Advanced Summer Institute Special session: New developments in enterprise modelling - Louvain - Belgique, 22-24 septembre 1999
- (CI21) V.Chapurlat, M.Larnac, J.Magnier, D.Crestani, C.Coves, F.Prunet, D.Chalvet, Modelling and analysis of Enterprise processes using Added-Value concept, IFIP Conference PROLAMAT'98 - Globalization of Manufacturing in the Digital Communications Era of the 21st Century - Trento, Italie, Septembre 1998
- (CI22) D.Crestani, C.Coves, F.Prunet, V.Chapurlat, M.Larnac, J.Magnier, User defined Multi-criteria Added Value for Enterprise Processes analysis, IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, San Diego, California, 11-14 Octobre 1998
- (CI23) M. Larnac, J. Magnier, V. Chapurlat, Temporal Logics for Analyzing the Behavior of Systems, CASYS'97 – 1st International Conference on Computing Anticipatory Systems, Liège, Belgique, 11-15 Août 1997

- (CI24) J.Magnier, M.Larnac, V.Chapurlat, Temporal Proof of the Behavior of Sequential Machines, International Conference on Intelligent Information Systems, Gran Bahama Island, Bahamas, 8-10 Décembre 1997, pp. 258-261
- (CI25) J. Magnier, M. Larnac, V. Chapurlat, The ISM: a Formal Tool for Modelling and Verification, 2nd Workshop on Trends in Theoretical Informatics, Budapest, Hongrie, 9-14 Mars 1997
- (CI26) M.Larnac, V.Chapurlat, J.Magnier, User-friendly modeling and formal verification of manufacturing systems, 1st IFC - Workshop on Manufacturing Systems: Manufacturing, Modelling, Management and Control (MIM'97) - Vienne, Autriche 3-5 Février 1997
- (CI27) M.Larnac, J.Magnier, V.Chapurlat, Past and Future Temporal Properties, 9th International Conference on Systems Research, Informatics and Cybernetics, Baden-Baden, Allemagne, 18-23 Août 1997
- (CI28) Chapurlat V., Larnac M., Magnier J., Crestani D., Prunet F., Chalvet D., Modelling and analysis of industrial complex systems, IFAC/IFIP Conference MCPL'97, Campinas, Brazil, pp 169-174, Septembre 1997
- (CI29) Crestani D., Prunet F., Chapurlat V., Larnac M., Magnier J., Chalvet D., A generic model oriented multi criterion Added-Value analysis for factory modelling, World Manufacturing Congress WMC'97 (ISMS part), New Zealand
- (CI30) M.Larnac, V.Chapurlat, J.Magnier, B.Chenot, Formal representation and proof of the interpreted sequential machine, Eurocast'97 - Fifth international conference on Computer Aided Systems Theory and Technology (CAST) - Lecture notes in Computer Science 1333, Springer, pp 95-107 - Las Palmas de Gran Canaria, Espagne, 23-28 Février 1997
- (CI31) M.Larnac, J.Magnier, G.Dray, V.Chapurlat, D.Chalvet, YAMMACS : Yet Another Modelling Method for the Analysis of Complex system, Eleventh International Conference on Systems Engineering - ICSE'96 - University of Nevada - Las Vegas - 9 au 11 Juillet 1996
- (CI32) V.Chapurlat, M.Larnac, G.Dray, Analysis and formal verification of Grafcet (FCCS) using Interpreted Sequential machine, IEEE CESA'96 - Juillet 96 - Lille
- (CI33) M.Larnac, J.Magnier, V.Chapurlat, Proof of temporal properties, 8th International Conference on Systems Research Informatics and Cybernetics, 14-18 Août 1996 - Baden-Baden
- (CI34) M.Larnac, J.Magnier, E.Vandermeulen, G.Dray, V.Chapurlat, Temporal and functional verification of a symbolic representation of complex systems, Eurocast'95 - Innsbrück - Autriche - Mai 1995 - Lecture Notes in Computer Science n°1030 - Springer Verlag 1996 p151 à 162
- (CI35) V.Chapurlat, F.Prunet, Modular specification, structured analysis and simulation of distributed control system: the ACSY-R model, ICARV'94 - Third International Conference on Automation, Robotics and Computer Vision - Singapour - 8 au 11 Nov. 1994

- (CI36) V.Chapurlat, F.Prunet, Specification, Analysis and validation of distributed control system: the ACSY-R model, IFAC NTDS'94 - First IFAC Workshop New Trends in Design Control Systems, Bratislava -7 au 11 Sept. 1994
- (CI37) V.Chapurlat, G.Monneret, F.Prunet, Discrete Events System Modelling and Software Engineering: ACSY, IEEE Compeuro'93 - 24/27 Mai 1993 - Paris/Evry

## **5 - CONFERENCES NATIONALES AVEC ACTES ET COMITE DE LECTURE**

- (CN1) F.Benaben, J.-P.Pignon, C.Hanachi, J.-P.Lorre, V.Chapurlat, Interopérabilité des systèmes en situation de crise, Workshop interdisciplinaire sur la sécurité globale, 30 et 31 Janvier 2007, UTT Troyes
- (CN2) S.Aloui, R.Collomp, V.Chapurlat, J-M.Penalva, A.Mousnier, P.Staccini, J-F.Quaranta, Performance du circuit du médicament au travers du management des risques iatrogènes, Congrès LambdaMu 15, Lille, octobre 2006
- (CN3) S.Aloui, R.Collomp, V.Chapurlat, J-M.Penalva, A.Mousnier, P.Staccini, J-F.Quaranta, Modélisation de système hospitalier pour le management du risque, Gestion et Ingénierie des Systèmes hospitaliers, GISEH 2006, septembre 2006
- (CN4) R.Collomp, S.Aloui, V.Chapurlat, J-M.Penalva, A.Mousnier, P.Staccini, J-F.Quaranta, Pilotage de la performance par le biais du management des risques : application au circuit du médicament, Gestion et Ingénierie des Systèmes hospitaliers, GISEH 2006, septembre 2006
- (CN5) S.Aloui, V.Chapurlat, J-M.Penalva, Réingénierie de systèmes complexes pour le management du risque, Journées JDMACS, Lyon, Septembre 2005
- (CN6) B.Vallespir, D.Crestani, C.Braesch, V.Chapurlat, L'intégration en modélisation d'entreprise : les chemins d'UEML, 4e Conférence Francophone de MODélisation et SIMulation, «Organisation et Conduite d'Activités dans l'Industrie et les Services», MOSIM'03, 23 au 25 avril 2003, Toulouse (France)
- (CN7) M.Larnac, JP.Pignon, J.Magnier, V.Chapurlat, Vérification et validation en ingénierie système, Nîmes'98 - Systèmes Complexes - Site EERIE de l'Ecole des Mines d'Alès, Mai 1998
- (CN8) P.Finotto, V.Chapurlat, D.Crestani F.Prunet, M.Larnac, G.Dray, Analyse et vérification des systèmes discrets complexes par coopération des modèles GRAFCET et Machine Séquentielle Interprétée, Modélisation des Systèmes Réactifs - MSR'96 - AFCET - Brest - mars 1996
- (CN9) V.Chapurlat, G.Monneret, M.Nanard, F.Pereyrol, F.Prunet, D.Simottel, Prototypage d'un atelier de Génie Automatique en programmation par objets, EC2/IA2 - La Grande Motte, 22-23 juin 1992 - page 131 à 141
- (CN10) V.Chapurlat, T.Giaccone, G.Monneret, F.Pereyrol, F.Prunet, Modèle structuré de spécification de systèmes à événements discrets utilisant le GRAFCET: le modèle ACSY, GRAFCET'92 - AFCET/MRT - Paris, 25-26 mars 1992 - page 79-88

## **6 - CHAPITRES D'OUVRAGE COLLECTIF**

- (OC1) V.Chapurlat, I.Marc, Choix public stratégique et système sociaux : Les théories de la décision et les méthodologies de l'approche système, Chapitre 'De la créativité à l'innovation au sein du processus de décision dans le contexte du problème des transports', 2002.
- (OC2) V.Chapurlat, Aide au pilotage de l'entreprise vu par les sciences pour l'Ingénieur (SPI), Rapport final de l'Action Spécifique : Aide à la Décision pour l'Evolution socio technique des Systèmes Industriels, n°64 du CNRS (ADESI), ju in 2004, 18 pages

## **7 - CONFERENCES SANS ACTES, SEMINAIRES ET JOURNEES D'ETUDE**

Les travaux de recherche ont été présentés à de nombreuses reprises dans le cadre du GRP, du GDR MACS, du GT ECI, de l'AFCEC ou de journées destinées aux industriels. La liste ci-dessous n'est pas exhaustive mais présente l'essentiel de ces présentations :

- (PT1) V.Chapurlat, S.Aloui, Une approche de vérification par preuve formelle pour l'analyse des risques dans une organisation de santé, Journées du GDR MACS, GT ECI, 2006
- (PT2) V.Chapurlat, Vérification et Validation en modélisation d'entreprise : Mythe ou réalité ? Journées GDR MACS, GT ECI, Aix en Provence, 21 Octobre 2004
- (PT3) V.Chapurlat, SAGACE : Une méthode de Modélisation des Systèmes Complexes, Journées GRP de Tarbes, GT5 Modélisation d'entreprise, 24 et 25 Octobre 2002
- (PT4) V.Chapurlat, Amélioration du système entreprise : concepts et applications, CRIIT Aix en Provence, 3 Juillet 2002
- (PT5) B.Kamsu-Foguem, V.Chapurlat, F.Prunet, Vérification et validation des modèles : une approche pour la Modélisation d'Entreprise, 1<sup>er</sup> workshop ECI Entreprise Communicante et Interopérabilité, Lyon, 2001
- (PT6) V.Chapurlat, Modélisation d'entreprise : Constructs, Journées GRP de Toulouse, GT5 Modélisation d'entreprise, 8 et 9 Novembre 2001
- (PT7) V.Chapurlat, Mission : Actions vers l'Industrie, Bureau du GRP, 27 et 27 Octobre 2000, Valenciennes
- (PT8) V.Chapurlat, E.Lamine, X.Olive, Concept de propriété : Le Langage LUSP, Session plénière du GRP, Annecy, 23 et 24 mars 2000
- (PT9) V.Chapurlat, E.Lamine, Groupe UEML : Présentation de travaux et Propositions, 25 Novembre 1999
- (PT10) V.Chapurlat, Modélisation en / dans / de l'Entreprise : La maîtrise des processus industriels, Journées productique, Nîmes, Juin 1999
- (PT11) V.Chapurlat, Présentation des travaux autour de la vérification de modèle, GT Grafcet, 14 et 15 Mai 1998
- (PT12) V.Chapurlat, MSI et Validation formelle du GRAFCET, Groupe GRAFCET de l'AFCEC, ENS Cachan, 2 Février 1996
- (PT13) V.Chapurlat, Utilisation de la MSI dans une nouvelle approche de modélisation pour le Génie Automatique, Groupe GRAFCET de l'AFCEC, ENS Cachan, 21 Mars 1996

(PT14) D. Diep, V. Chapurlat, K. Benaïssa : "Mise en place d'un système de gestion de production (MES) à l'aide d'agents – le projet PABADIS PROMISE". Journée "Agents appliqués aux systèmes de production et à la chaîne logistique", Annecy, 17 oct. 2006.

## **8 - RAPPORTS DE RECHERCHE**

Divers rapports de recherche ont été établis. Seuls sont évoqués ci-dessous ceux des 4 dernières années :

- (RR1) V.Chapurlat, Cahier des charges fonctionnel du projet n°1 de la PGI : Projet maîtrise des aléas de production Rapport de recherche Avril 2002, 143 pages [RR02/G3/007]
- (RR2) V.Chapurlat, Crestani D., Coves C., Prunet F., Larnac M., Magnier J., Proposition d'interface graphique pour l'estimation de processus d'entreprise Rapport de recherche Avril 2002, 84 pages [RR02/G3/008]
- (RR3) V.Chapurlat, Nano2Life Web Site: A User Guide V 1.0, avril 2004, 17 pages [RR04/010]
- (RR4) V.Chapurlat, Aide au pilotage de l'entreprise vu par les sciences pour l'Ingénieur (SPI), Rapport final de l'Action Spécifique : Aide à la Décision pour l'Evolution socio-technique des Systèmes Industriels, n°64 du CNRS (ADESI).juin 2004, 18 pages [RR04/015]
- (RR5) V.Chapurlat, SPFCNet Web Site : A User Guide V1.0, juin 2004, 20 pages [RR04/016]
- (RR6) V.Chapurlat, C.Braesch, Verification, Validation and Accreditation of Entreprises Models, 2 février 2005, 8 pages [RR05/008]
- (RR7) V.Chapurlat, D .Diep, The P2 meta model, Rapport de recherche du projet européen PABADIS PROMISE: PABADIS base product oriented manufacturing systems for re-configurable enterprises, 2006 [RR06/031]

## **9 - RAPPORTS DE CONTRATS**

Plusieurs rapports de fin de contrat ont été rédigés suite à des abondements ANVAR (1998 et 2002), des projets en collaboration avec des industriels régionaux et nationaux (Tolerie JRDucros 1998, Merlin-Gérin 1999, CdCF MG 1999, SI-Automation 2003, projet NanoToLife 2001, projet SPFCNet 2002) et des projets européens (MESIMA 2005, PABADIS-PROMISE 2006).

## **B - ENCADREMENT**

Les responsabilités d'encadrements liés à la recherche et les taux d'encadrement sont synthétisées dans la Figure 56.

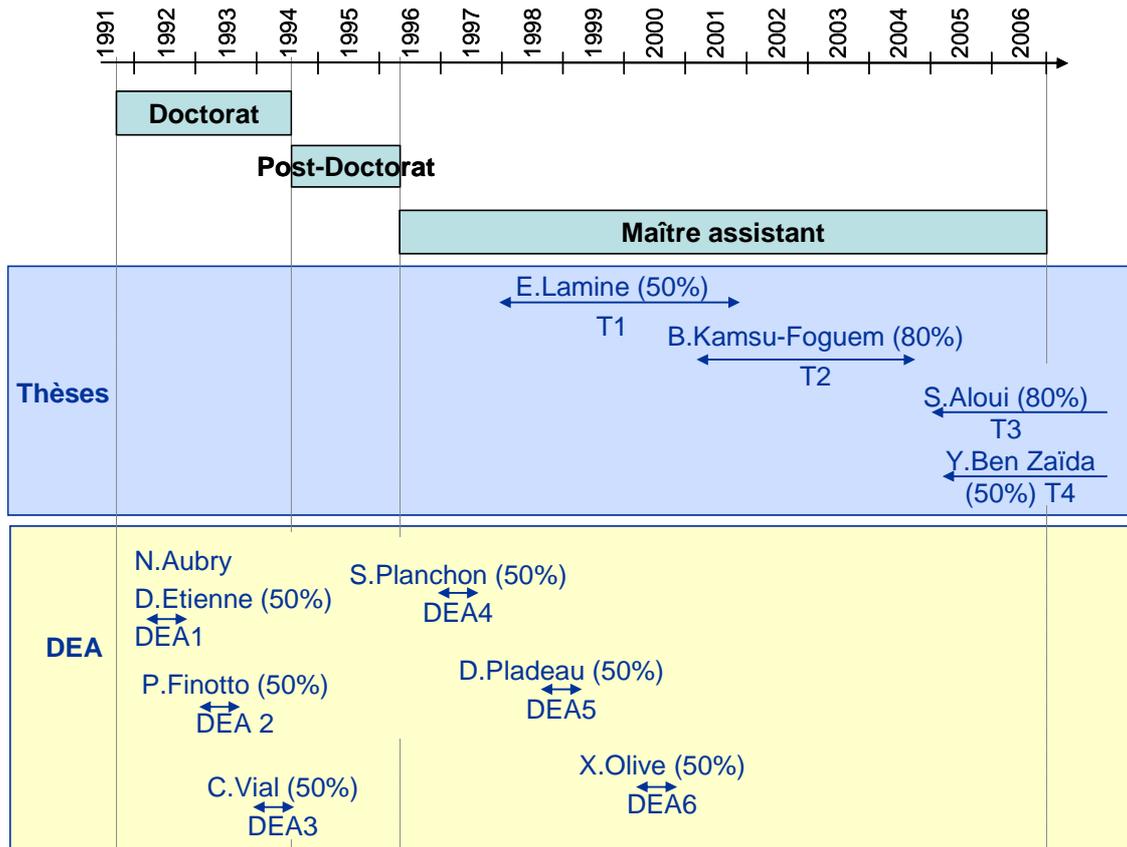


Figure 56 : Synthèse des encadrements de recherche (Thèses, DEA, Autres)

## 1 - ENCADREMENTS DE THESEES

J'ai encadré 5 thèses dont deux ont été soutenues et deux devraient être soutenues d'ici fin 2007. Le Tableau 7 résume les informations essentielles sur ces thèses.

Ref.	Description
(T1)	<p><b>E.LAMINE</b></p> <p><b>Taux d'encadrement</b> de 50% avec Mme le professeur J.Magnier</p> <p><b>Problématique</b> : Les premières questions posées dans le cadre de cette recherche ont été les suivantes : qu'est ce qu'une propriété ? comment la caractériser dans le cas d'un modèle de système complexe ou dans le cas d'un système complexe lui-même ? comment caractériser l'ensemble des propriétés d'une entité ?</p> <p><b>Titre</b> : Définition d'un modèle de propriété et proposition d'un langage de spécification associé : LUSP</p> <p><b>Déroulement</b> : Thèse débutée en octobre 1997 et soutenue en Décembre 2001. Le travail a consisté à faire un bilan des approches de modélisation de propriétés, des types de propriétés qui sont ou devraient être prises en considération et de proposer puis de formaliser un modèle de spécification. Ce modèle baptisé CREDI est le composant de base de LUSP, vu à la fois comme un langage</p>

	<p>support et comme un outil de spécification, dont le développement a commencé dès le milieu de cette thèse.</p> <p><b>Jury de soutenance :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mme. MAGNIER Janine, Professeur, EMA, Directeur de thèse</li> <li>• M. MOREL Gérard, Professeur, Université de Nancy, Rapporteur</li> <li>• M. HAURAT Alain, Professeur, Université de Savoie, Rapporteur</li> <li>• M. PRUNET François, Professeur, Université de Montpellier II, Examineur</li> <li>• M. CRESTANI Didier, Maître de Conférences, HdR, UM II, Examineur</li> <li>• M. CHALVET Denis, Ingénieur de Recherche, Groupe Schneider, Examineur</li> <li>• M. CHAPURLAT Vincent, Maître Assistant, EMA, Examineur</li> </ul> <p><b>Devenir :</b> Elyes LAMINE est Maître de Conférences. Il a d'abord eu un poste au LAAS (Toulouse), puis a été détaché pour un an à l'EMAC (Albi). Il est aujourd'hui Maître de Conférences à Castres.</p>
(T2)	<p><b>B.KAMSU-FOGUEM</b></p> <p><b>Taux d'encadrement</b> de 80% avec Mme le professeur J.Magnier la première année puis avec M. le professeur F.Prunet les deux années suivantes.</p> <p><b>Problématique :</b> Cette thèse tente de répondre à la deuxième question de cette recherche : comment prouver une propriété si l'on considère la propriété non seulement comme la traduction d'une attente mais aussi comme une connaissance supplémentaire et souvent implicite que l'on ne pense pas à respecter dans un modèle ou qu'il est impossible de décrire avec le formalisme utilisé pour établir ce modèle ? Quels peuvent être les raisonnements applicables au graphe de propriétés d'une entité ? Avec quels outils de raisonnement ?</p> <p><b>Titre :</b> Modélisation et Vérification des propriétés de systèmes complexes : Application aux processus d'entreprise</p> <p><b>Déroulement :</b> Thèse débutée en octobre 2000 et soutenue en Juillet 2004. Divers concepts et outils de manipulation de graphe décrivant des connaissances ont été testés tels que les Réseaux Bayésiens. Les graphes conceptuels ont finalement été choisis pour représenter et raisonner sur cette connaissance. L'application visée était de fournir un framework dédié à la vérification de propriétés pour UEML (Unified Enterprise Modelling Language) qui était en cours de développement.</p> <p><b>Jury de soutenance :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• M. Pierre LADET Professeur, INPG, Rapporteur</li> <li>• M. Hervé PINGAUD, Professeur, Ecole des Mines d'Albi, Rapporteur</li> <li>• M. François PRUNET Professeur, UM II, Directeur de thèse</li> <li>• Mme M-Laure MUGNIER, Maître de Conférences, HdR, UM II, Examineur</li> <li>• M. Vincent CHAPURLAT, Maître Assistant, EMA, Examineur</li> </ul>

	<p><b>Devenir</b> : Bernard Kamsu-Foguem est actuellement Maître de Conférences à l'ENI de Tarbes.</p>
(T3) Depuis 2004	<p><b>S.ALOUI</b></p> <p><b>Taux d'encadrement</b> de 50% en collaboration avec M. J-M.Penalva.</p> <p><b>Problématique</b> : le sujet confié au précédent candidat (D. Gharbit) ayant dû être abandonné, j'ai souhaité recentrer le domaine de recherche sur la modélisation d'entreprise et formaliser l'aide potentielle que des techniques de vérification et de validation pourraient apporter à la maîtrise du risque en situation de pilotage d'une organisation.</p> <p><b>Titre</b> : Approche de modélisation et d'analyse d'organisation de santé pour la maîtrise du risque</p> <p><b>Déroulement</b> : thèse débutée en Octobre 2004. La formalisation d'une approche intégrée de modélisation multi vues, multi formalismes multi niveaux de détail puis de vérification pour la détection de situations et d'événements initiateurs de risques est maintenant en cours de validation sur site. L'application choisie concerne le pilotage des processus hospitaliers en présence de risques iatrogènes. Cette application est faite en collaboration avec l'équipe du CHU de Nice en charge de la prévention et de la gestion des Risques Iatrogènes sur le circuit du médicament.</p>
(T4) Depuis 2004	<p><b>Y.BEN ZAÏDA</b></p> <p><b>Taux d'encadrement</b> 50% en co-encadrement avec D.Crestani (Directeur de thèse) du LIRMM Montpellier.</p> <p><b>Problématique</b> : La discipline des Sciences Pour l'Ingénieur (SPI) s'est peu concentré de l'aspect stratégique en entreprise et s'est effectivement concentrée sur les aspects tactiques et opérationnels, certainement plus aisément formalisables et plus facilement transférables dans un contexte industriel de production de biens ou de services. A l'opposé, les Sciences de Gestion mais aussi les Sciences Humaines et Sociales ont proposé nombre de travaux et de concepts pour travailler au niveau stratégique. Cependant, la nature des informations nécessaires et les caractéristiques essentiellement humaines que ces modèles doivent décrire ne permettent pas d'atteindre un très haut niveau de formalisation. Ils sont de plus souvent très globaux, et peu généralisables puisque chaque organisation est considérée comme un cas particulier. Il s'agit donc dans ce travail de tenter un premier rapprochement entre ces disciplines et de tenter de caractériser l'impact d'une stratégie sur les niveaux tactique puis opérationnel dans l'entreprise. Il faut pour cela proposer un cadre de modélisation suffisamment ouvert mais aussi suffisamment formel pour permettre de modéliser le système entreprise et de l'analyser avec un objectif de conduite à la fois des processus mais aussi du changement.</p> <p><b>Titre</b> : Aide à la Décision Stratégique pour le Pilotage du Système Entreprise.</p>

	<p><b>Déroulement</b> : thèse débutée en Novembre 2004. Cette idée nécessite de choisir et d'enrichir un langage de modélisation permettant, d'une part, de couvrir la totalité des vues nécessaires au développement de l'activité de pilotage mais aussi des trajectoires d'évolution, d'autre part, de vérifier et de valider ces modèles, enfin, de faire émerger des structures organisationnelles nouvelles.</p>
--	--

Tableau 7 : Thèses encadrées ou en cours

## 2 - ENCADREMENTS DE DEA

J'ai encadré ou co encadré 6 DEA depuis 1991 qui sont résumés dans le Tableau 8.

<i>Ref.</i>	<i>Description</i>
(DEA 1)	<p><b>D.ETIENNE / N.AUDRY</b> - 1991/1992</p> <p><b>Taux d'encadrement</b> 30% en collaboration avec G.Monneret et M. le Professeur F.Prunet</p> <p><b>Sujet</b> : Etude du dictionnaire de conception associé au modèle ACSY-R</p>
(DEA 2)	<p><b>P.FINOTTO</b> - 1992/1993</p> <p><b>Taux d'encadrement</b> 50% avec M. le professeur F.Prunet</p> <p><b>Sujet</b> : Mise en place des mécanismes de réutilisation dans la spécification et la conception de Systèmes de Contrôle/Commande. Ces mécanismes permettent de mieux structurer et de réutiliser une partie commande existante</p>
(DEA 3)	<p><b>C.VIAL</b> - 1993/1994</p> <p><b>Taux d'encadrement</b> 50% avec M. le professeur F.Prunet</p> <p><b>Sujet</b> : Développement et mise en place des mécanismes de simulation nécessaires pour valider un Système de Contrôle/Commande Réparti</p>
(DEA 4)	<p><b>S.PLANCHON</b> -1996/1997</p> <p><b>Taux d'encadrement</b> 50% avec Mme. le professeur J.Magnier</p> <p><b>Sujet</b> : MSI synchrone et temporisée</p>
(DEA 5)	<p><b>D.PLADEAU</b> - 1997/1998</p> <p><b>Taux d'encadrement</b> 50% avec Mme. le professeur J.Magnier</p> <p><b>Sujet</b> : Formalisation d'une sémantique opérationnelle de modèle de processus d'entreprise : utilisation de la MSI synchrone</p>
(DEA 6)	<p><b>X.OLIVE</b> -1999/2000</p> <p><b>Taux d'encadrement</b> 50% avec Mme. le professeur J.Magnier</p> <p><b>Sujet</b> : Définition et implémentation du Langage Unifié de Spécification de Propriétés (LUSP)</p>

Tableau 8 : Encadrements de DEA

### 3 - ENCADREMENTS PEDAGOGIQUES LIES A L'ACTIVITE DE RECHERCHE

J'ai encadré un certain nombre d'élèves (universitaires et ingénieurs) à des fins de développement d'outils liés à l'activité de recherche. Ces encadrements et les sujets sont décrits dans le Tableau 9.

<b>Ref.</b>	<b>Description</b>
(PL)	<p><b>Projets Longs EMA</b> (3<sup>ème</sup> année) de 2000 à 2006 sur les sujets suivants :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Vérification formelle de propriétés,</li> <li>- Introduction de la notion de risque dans une approche de modélisation d'entreprise,</li> <li>- Transformation de modèles par l'approche MDA et Analyse des limites de l'outil de manipulation de graphes conceptuels COGITANT</li> </ul>
(IR/ES et FCR)	<p><b>Initiations à la Recherche</b> (3<sup>ème</sup> année EMA), Etudes Scientifiques (2<sup>ème</sup> année EMA) et Formation Complémentaire par la Recherche de 1995 à 1999 sur les sujets :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Réalisation d'un simulateur de système de production,</li> <li>- Etat de l'art en modélisation d'Entreprise : GRAI, PERA et CIMOSA,</li> <li>- Développement d'un modèle de preuve sémantique et syntaxique partielle pendant la phase de modélisation d'un processus en entreprise,</li> <li>- Les automates temporisés,</li> <li>- Utilisation de la MSI pour la preuve de propriétés du GRAFCET,</li> <li>- Mise en place de mécanismes de preuve de propriétés du GRAFCET,</li> <li>- Les réseaux Locaux Industriels,</li> <li>- Modèles conceptuels de données pour la productique,</li> <li>- Développement d'un cadre de modélisation pour la conception de systèmes temps réel : utilisation de la MSI</li> </ul>
(STA1)	<p><b>Stage Ingénieur CNAM filière Informatique, 1992</b></p> <p>Etude et mise en place de la documentation automatique pour le contrôle/commande utilisant des concepts hypertexte</p>
(STA2)	<p><b>IUP Avignon, 1997</b></p> <p>Analyse et conception d'un atelier de description et d'analyse de processus industriels</p>
(STA3)	<p><b>IUP Avignon, 1998</b></p> <p>Analyse et programmation JAVA d'un outil d'analyse de la valeur ajoutée de processus industriels</p>
(STA4)	<p><b>POLYTECH Marseille, 2004</b></p> <p>Recherche bibliographique sur les moyens de Vérification et de Validation dans les systèmes logiciels</p>

Tableau 9 : Encadrements d'élèves et de stagiaires à des fins de recherche

## **C - TRANSFERTS ET COLLABORATIONS INDUSTRIELLES**

Depuis 1996, j'ai proposé et participé à plusieurs projets de transfert en collaboration avec l'industrie. Dans l'idée, le transfert d'une recherche est quelquefois associé à une certaine dénaturation scientifique pour répondre à des besoins industriels précis. C'est cependant un acte légitime que celui d'initier puis de confronter des idées et des concepts à la réalité environnante, et de disposer ainsi de cas d'applications réels et de démonstrateurs.

Cette collaboration s'est organisée dans différents cadres et au travers de différents types de projets allant du projet impliquant des partenaires régionaux jusqu'au montage et à la participation active dans des projets européens.

Ces projets sont les suivants :

### **1 - PABADIS'PROMISE : PABADIS BASED PRODUCT ORIENTED MANUFACTURING SYSTEMS FOR RECONFIGURABLE ENTERPRISES**

Le projet P2 (<http://www.pabadis-promise.org/>) est un projet européen de type STREP (FP6 - IST016649) débuté en 2005 et devant être terminé en 2008.

L'objectif du projet P2 est de développer des systèmes de contrôle commande distribués, flexibles, autonomes et ouverts basés sur des technologies agents circulant et hébergés par des tags RFID. Le but est donc de concevoir architecture d'agents logiciels totalement interopérables devant assumer les fonctions de contrôle commande dans les futurs systèmes de production flexibles.

Mon rôle dans le projet P2 est de développer, de vérifier et de valider sur deux scénarios fournis par les partenaires industriels, le méta modèle d'un langage de modélisation d'un système de production. Ce langage doit couvrir les besoins de description des vues produit, processus, ressources et information. Ces dernières devront à terme être échangées sans perte de sémantique ni d'intégrité entre les agents. Chaque agent est en effet chargé du contrôle d'une partie d'un processus, d'un produit passant d'une ressource à une autre ou encore d'une ressource elle-même.

Je suis ensuite impliqué dans le développement d'une ontologie des systèmes de production basée sur ce méta modèle. Le travail a consisté à faire un état de l'art des approches de modélisation et de caractérisation des données, informations et connaissances nécessaires pour le pilotage de systèmes de production complexes (ISA95, eFFBD, différents standards ISO, travaux approchants tels que ceux proposés par le projet TORERO, etc.). Il a ensuite fallu formaliser tous les concepts et relations entre concepts, attributs et contraintes nécessaire à décrire un tel système. La vérification et la validation se font au moyen d'outils formels et de simulation. J'ai pour cela développé un modèleur permettant de manipuler le langage de modélisation obtenu et de décrire les scénarios d'application du projet P2.

Les partenaires industriels de ce projet sont : FIAT CRF (Italie), Siemens (Allemagne), SAP (Allemagne), MCM (Italie), Defi'System (France) et ACE (Grèce).

Les partenaires académiques sont : LGI2P (France), Politecnico di Milano (Italie), Univ. of Magdeburg (CVS@IAF, Allemagne), ISI (Grèce), AAS (Autriche).

## **2 - ISYCRI : INGENIERIE DES SYSTEMES DE CRISE**

Le projet ISyCri est un projet ANR commencé début 2007 en collaboration avec la DRGI de l'Ecole des Mines d'Albi-Carmaux, EBM-WebSourcing, SOC de l'IRIT de l'Université Toulouse 1 (Sciences Sociales), THALES Communications et la société AXILYA. C'est un projet de 24 mois.

Dans une situation de crise (catastrophe naturelle, explosion de violence, etc.), plusieurs intervenants (sécurité civile, forces de l'ordre, personnels de santé, organisations non gouvernementales, forces armées, etc.) sont généralement appelés à agir simultanément et dans l'urgence, à coordonner leurs objectifs et leurs actions, et à mettre en œuvre collectivement les ressources qui sont à leur disposition vis-à-vis d'une finalité partagée. Cette interopérabilité s'avère une composante majeure de l'objectif de réduction de la criticité de la situation (objectif prioritaire compte tenu des enjeux : humains, économiques, etc.) et doit prendre en compte les niveaux d'hétérogénéité des partenaires (culturelle, fonctionnelle, technologique, etc.). Le projet ISYCRI propose d'effectuer des travaux en vue d'apporter des résultats simultanément sur deux plans :

- la coordination des réactions génériques éventuellement définies chez les divers partenaires (réactivité),
- l'adaptabilité de cette réaction collective à l'avancement dans la situation de crise (flexibilité).

Mon rôle dans ce projet est de participer à la caractérisation des collaborations en contexte critique et de définir des cas d'usage applicatifs. Il faut ainsi définir et proposer des mécanismes de représentation et d'analyse adaptés à la description des synchronisations entre des processus d'urgence, entre des systèmes d'informations distants et non interopérables et de faire apparaître de possibles risques devant être maîtrisés sous peine d'une aggravation de la crise.

## **3 - SOFIA II**

Le projet SOIFA II a pour objectif le développement d'un outil de génération de scénarios pour la formation de personnes à la maîtrise des situations de crise.

Nous allons mettre en œuvre dans ce projet une première approche de simulation par systèmes multi agents. Ce SMA sera utilisé pour simuler le comportement d'une organisation complexe, un état major de crise comprenant des personnels venant de divers horizons, ayant diverses compétences et diverses responsabilités dans la gestion d'une crise de type incendie, pollution ou inondation. L'approche de modélisation développée dans le cadre de la thèse de S.ALOUI sera ainsi dotée d'une sémantique opérationnelle basée sur l'usage de ce SMA.

## **4 - MESIMA : MANUFACTURING AND ENTERPRISE SIMULATION ARENA**

Le projet MESIMA est un projet européen de type LEONARDO débuté en 2003 et terminé en 2006.

L'objectif est de développer un cursus de formation à distance sur les outils de la productique et en particulier les outils de simulation pour l'amélioration et le pilotage des systèmes de production.

Mon rôle a consisté à développer des supports de cours, des supports d'évaluation et des simulateurs dans les domaines des méthodes orientés JIT (Kanban, SMED, 6 Sigma et autres techniques d'amélioration de systèmes de production). J'ai ensuite développé un cours et un simulateur montrant l'intérêt des organisations émergentes des entreprises de production, en particulier sur le concept d'entreprise virtuelle.

Ce projet a permis, d'une part, de développer des outils de simulation évolués, d'autre part de maîtriser de nouvelles techniques de conception et de diffusion de cours via les technologies web.

Le descriptif des partenaires et l'ensemble des résultats de ce projet est accessible à l'adresse <http://www.mesima.org/>.

## **5 - MAITRISE DES ALEAS DE PRODUCTION**

Dans le cadre de la Plate forme de Génie Industriel (PGI) qui a été créée à l'occasion, la société Merlin Gerin Alès nous a demandé de participer activement au projet 'Maîtrise des aléas de production'. Ce projet s'est déroulé de 1997 à 1999. Les partenaires étaient MG Alès, le LGI2P et le LIRMM de Montpellier.

Comme évoqué dans la partie recherche (page 54), ce projet a consisté à développer une approche de modélisation et d'évaluation de performance des processus opérationnels d'une unité de production.

Mon rôle a consisté à développer, à formaliser et à outiller le langage de modélisation MOV, le méta modèle CANEVAS des langages de modélisation de processus en entreprise et une approche de modélisation et de vérification de la performance. Les résultats sont détaillés dans la partie recherche.

## **6 - ABONDEMENTS ANVAR (1996/97, 2002/03)**

L'ANVAR fournit chaque année des fonds permettant aux chercheurs et aux industriels de s'associer pour développer ou parfaire un projet de recherche commun.

J'ai été impliqué puis responsable de deux abondements qui m'ont permis de développer plus avant :

- Entre 1996 et 1997, un outil de gestion des projets en productique. Mon rôle a consisté à consolider l'approche de modélisation, à l'adapter aux processus de type projets en productique en respectant le cadre GERAM et de développer une démarche d'analyse formelle des modèles de processus et des trajectoires d'évolution de ces projets de productique dans le temps. L'Ecole des Mines de Saint Etienne était le deuxième partenaire de ce projet. Les concepts développés sont à l'origine de certaines avancées utilisées ensuite durant le projet Merlin Gerin et actuellement utilisés dans le cadre de la thèse me Mlle Y.Ben Zaïda.

- Le prototype de l'outil support et de manipulation du Langage Unifié de Spécification de Propriétés (LUSP). Ce projet a eu pour partenaire le CEA au travers de son Unité de Recherche sur la Complexité (URC) basée sur le site EERIE.

## 7 - AUTRES PROJETS

- **J.R.Ducros** (1997) : spécification et implémentation d'un système d'information pour synchroniser et améliorer la réactivité du bureau d'études et de l'atelier de production dans une unité de production de type tôlerie fine.
- **Bouygues Telecom** (1997/1999) : spécification fonctionnelle et validation d'un outil d'optimisation de placement géographique de bornes de télécommunication.
- **Ministère des transports** (2003) : Rédaction d'un chapitre (OC2) dans un ouvrage collectif mettant en avant la nécessité et les démarches de modélisation de problème dans le cadre du transport routier.
- Participation à l'Action Spécifique AS **ADESI** n°64 du CNRS : Aide à la Décision pour l'Evolution Sociotechnique des Systèmes Industriels (2003/2004). Mon rôle durant cette AS a consisté à réfléchir, à comparer et à proposer des moyens à mettre œuvre pour rapprocher le domaine des SPI avec le domaine des SHS en ce qui concerne le pilotage du changement dans l'industrie. En parallèle, j'ai été impliqué dans la rédaction du rapport final (OC1) paru en octobre 2004 et ai été responsable du site web de l'AS.
- Chef de projet pour l'EMA du projet **SPFCNET** (CEA en 2004) : L'objectif est de mettre à disposition d'un groupe de chercheurs assez important (280 chercheurs répartis sur le territoire européen) un outil de travail collaboratif sur le thème des piles à combustible.
- Chef de projet pour l'EMA du **Network of Excellence Nano2Life** du 6<sup>ème</sup> PCRD (2003) : Comme SPFCNet, l'objectif est de mettre à disposition d'un Réseau d'Excellence dans le domaine des biotechnologies (200 chercheurs répartis sur le territoire européen) un outil de travail collaboratif incluant nombre de fonctionnalités. L'ensemble a été spécifié et validé avant d'entreprendre les développements informatiques nécessaires pour rendre ces deux outils de travail collaboratifs accessibles via le Web.

Je suis intervenu dans le cadre de séminaires autour de la modélisation de processus et du pilotage de la performance : Journée de la productique (Nîmes 1999), Séminaire sur la performance en collaboration avec la société Schneider (Aix en Provence 2002), formations spécialisées au sein des sociétés AREVA (Juin 2004), Technicatome (Septembre 2004) et SOTRALU (2003).

Enfin, le LGI2P est associé à un incubateur d'entreprises qui se positionne actuellement parmi les premiers incubateurs français. Je suis intervenu auprès de certains des créateurs d'entreprise sur des problématiques de formalisation des besoins, de rédaction et de validation de cahier des charges.

## 8 - RESPONSABILITES DANS LE MONTAGE DE PROJETS

Enfin, j'ai été impliqué dans la préparation et le suivi de plusieurs projets de recherche dont :

- Responsable de la proposition de l'EOI concernant le **REX TWIST** (Réseau d'Excellence Trust With Innovation in Socio-Technical systems). Ce Réseau devait permettre à divers partenaires Belges, Français et Suisse travaillant dans les domaines connexes de l'Ingénierie des Besoins, de l'Ingénierie des Systèmes et de la Vérification/Validation, de proposer et d'animer des axes de recherche conjoints entre plusieurs communautés concernées par ces domaines. Mon rôle était celui de coordinateur et de rédacteur de la proposition en relation avec les partenaires européens.

- Responsable du montage du projet Européen du 6<sup>ème</sup> PCRD **EXERT** (2005) : l'objectif du projet était de développer des approches mixant approches formelles, simulation et approches systèmes pour modéliser et décrire le phénomène d'émergence de propriétés dans les systèmes complexes. Mon rôle était celui de responsable du montage du projet (13 partenaires, 6 pays représentés, 36 mois de développement).

- Responsable de la proposition du projet RNTS (Réseau National des Technologies de Santé) **SysThePAD** en collaboration avec le CHU de Montpellier, le LIRMM et deux sociétés régionales. Il s'agissait de développer une démarche d'ingénierie et de validation de systèmes technologiques pour les personnes âgées dépendantes.

- Participation au montage du projet Européen du 6<sup>ème</sup> PCRD **GRIDMAN** (2004) : l'objectif était de développer une approche inspirée du GRID pour les systèmes manufacturiers. En effet, la notion d'organisation virtuelle de production peut se modéliser sous forme d'un réseau de compétences et de ressources. Un tel réseau, les contraintes de collaboration et de compétition entre les ressources, les notions de flux, etc. s'inspirent alors d'une architecture de type GRID employée fréquemment dans le cas de partage de ressources de calcul de façon à optimiser le travail massivement parallèle que permettent de genre d'architecture. Mon rôle a consisté à assister la phase de montage et de négociation en mettant en avant la nécessité de modéliser et de vérifier le modèle de l'architecture résultante.

- Participation au montage du projet Européen du 6<sup>ème</sup> PCRD **COPENET** (2003) : l'objectif est de développer et de mettre à disposition des PME/PMI les outils leur permettant de représenter, de contractualiser puis de mettre en œuvre concrètement et de piloter selon plusieurs stratégies possibles une organisation de type entreprise virtuelle. Mon rôle était de me charger de la partie modélisation et validation de l'organisation dans le projet qui comptait 4 parties en tout.

- Réponse à différents **appels à projets** : Proposition avec le Centre Hospitalier d'Alès pour mener à bien la réorganisation des services et ressources dans le cadre du projet du 'Futur Hôpital neuf' (2004), PROSPER (1998 à 2001), IRAI (1997), Jallate S.A. (1997), ARIS (1998), POLONIUM (1998), SICN (1998), Plan textile (1999), RNTL Baeurer (2000), CodSystème (2000), SI-Automation (2003, projet financé par la région Languedoc Roussillon)

## **D - RESPONSABILITES LIEES A LA RECHERCHE**

La Figure 57 synthétise mes activités et responsabilités liées à la recherche. Il s'agit de participation à des groupes de travail, des comités de relecture et d'organisation

d'événements, des activités de support à la diffusion de travaux destinés à la communauté et enfin de participation à des jurys de thèse.

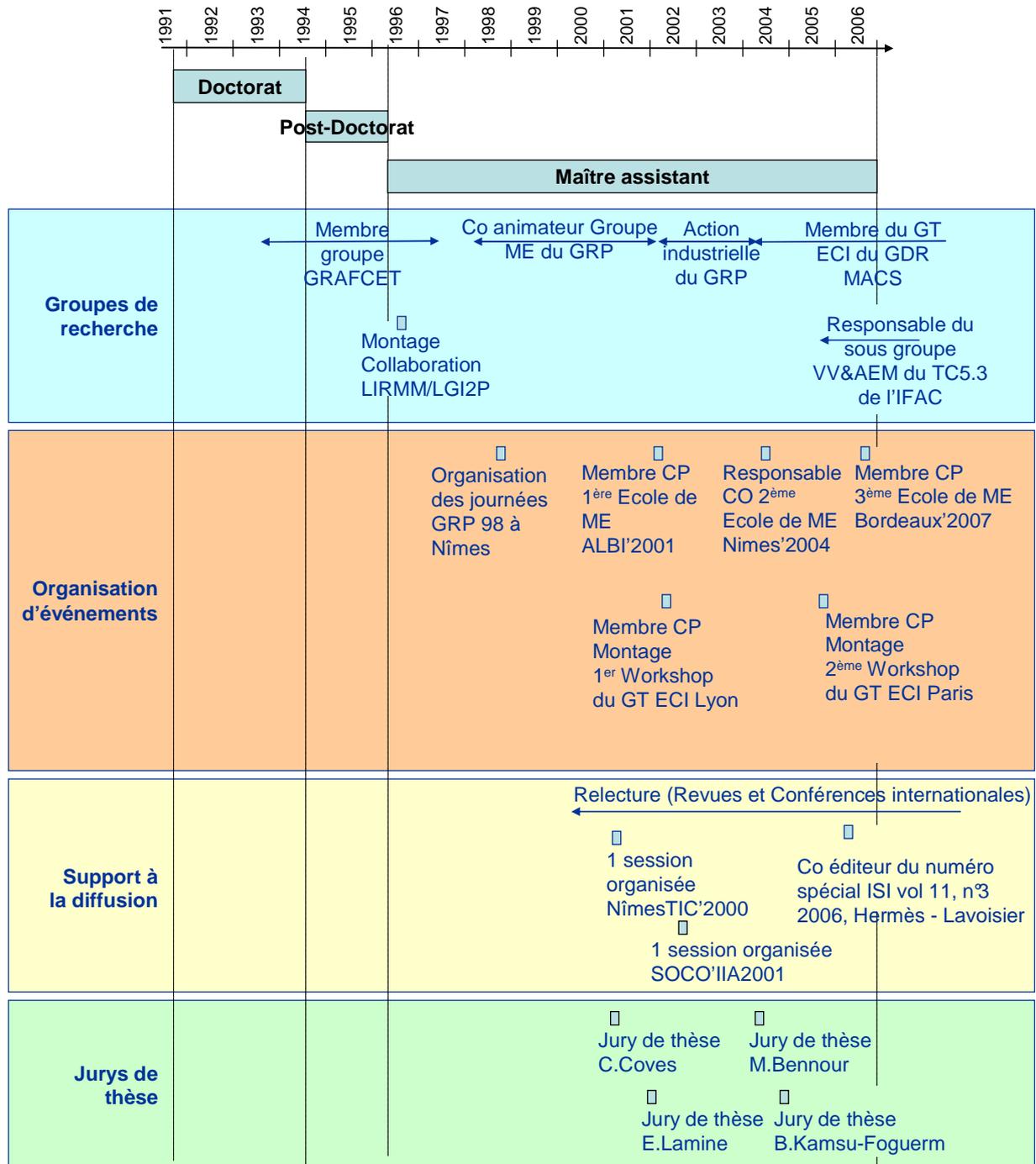


Figure 57 : Responsabilités et implications dans la communauté scientifique

Ces activités sont présentées, chronologiquement et thème par thème, dans les tableaux suivants :

<b>Période</b>	<b>Implication dans la communauté de recherche</b>
2006	Membre du comité de pilotage de la troisième 'Ecole de Modélisation d'Entreprise : ME et Décision', Bordeaux.  Intervenant sur le thème du risque et de la décision en modélisation d'entreprise en collaboration avec D.Gourc (Ecole des Mines d'Albi-Carmaux).
2005/2006	Coordinateur en collaboration avec K.Benali (LORIA) du numéro spécial de la revue Ingénierie des Systèmes d'Information (ISI) n°11, volume 3/2006, ISBN 2-7462-1524-1 sur le thème de l'Ingénierie des Processus et des Systèmes d'Information
2004	Responsable du montage et du pilotage de la deuxième école de modélisation d'entreprise : 'Modélisation d'entreprise et système d'information' en mars 2004 en collaboration avec le CNRS, les Groupements de Recherche (GDR) MACS et I3 du CNRS et le Club des enseignants chercheurs en Génie Industriel. Cette école s'est déroulée sur le site de Nîmes les 10, 11 et 12 mars 2004.
Depuis fin 2004	Responsable du sous-groupe de travail 'Verification, Validation and Accreditation of Enterprise Models' du Technical Committee TC5.3 'Enterprise Integration and Networking' de l'IFAC
Depuis 2002	Membre du GT ECI Entreprise Communicante et Interopérabilité du GDR MACS
2001	Membre du comité de pilotage de la première école de modélisation d'entreprise qui s'est déroulée à Albi
De 1997 à 2001	Co-animateur avec B.Vallespir (IMS département GRAI, Bordeaux) du Groupe de Travail 'Modélisation d'Entreprise' (GT5) du Groupement de Recherche en Productique (GRP) qui a été l'un des éléments fédérateurs à l'origine du GDR MACS 'Modélisation et Analyse de la Commande des Systèmes' du CNRS.
2000 à 2002	Membre du Bureau National du GRP chargé de l'Action Industrielle.
2001 et 2003	Membre de comités scientifiques : <ul style="list-style-type: none"> <li>• 1<sup>er</sup> Workshop ECI (Lyon), 2001</li> <li>• 2<sup>ème</sup> Workshop ECI (Paris), 2003</li> </ul>
1998	Responsable de l'organisation des journées du Groupement de Recherche en Productique Nîmes'98
Depuis 2004	Relecteur IJPR (International Journal of Production Research)
Depuis 2003	Relecteur Revue pour la Conception et Fabrication Assistée par Ordinateur (RCFAO)
Depuis 2002	Relecteur JESA (Journal Européen des Systèmes Automatisés)

Depuis 2000	Relecteur pour des conférences internationales : ETFA 2006, INCOM 2006, EI2N 2006, I-ESA 2006, IFAC World Congress Prague 2005, Interop-ESA 2004, CESA 2003, ETFA 2003
Depuis 2000	Relecteur pour des conférences nationales : workshops ECI, GI2005, MOSIM 2004, MOSIM 2003, MOSIM 2001.
Depuis 1999	Organisation de sessions et dans le cadre de conférences internationales, SOCOIIA'2001, Nîmes TIC'2000, IIA'99.
Depuis 1997	Participation au montage de congrès : <ul style="list-style-type: none"> <li>• Nîmestic'2000</li> <li>• IIA'97 et IIA'99 (Intelligent Industrial Automation - ICSC International Computer Science Convention)</li> </ul>

Tableau 10 : Support à la communauté de recherche

<b>Période</b>	<b>Jurys de thèses</b>
2004	Examineur M.Bennour (LIRMM - 2004)
2000	Examineur C.Coves (LIRMM – 2000)

Tableau 11 : Jurys de thèses (outre les jurys de E.Lamine et B.Kamsu Foguem)

<b>Période</b>	<b>Autres implications et responsabilités</b>
Depuis juillet 2006	Membre du groupe de travail Intégration, Vérification, Validation, Qualification (IVVQ) de l'Association Française d'Ingénierie Systèmes (AFIS).
Depuis 2003	Expert auprès du Conseil Scientifique du Pôle Productique Régional de Languedoc-Roussillon, devenu le Département Productique, Mécanique et Informatique de Transfert Languedoc Roussillon (Transfert-LR).
Depuis 1999	Représentant de l'Ecole des Mines d'Alès auprès du Groupement de Ecoles des Mines en Génie Industriel (GEM-GI) qui traite des problèmes de recherche et d'enseignement.
2001	Expert invité du projet Européen du 5 <sup>ème</sup> PCRD UEML (Unified Enterprise Modeling Language)
Depuis 1998	Membre de la SEE
Depuis 2000	Membre et un des fondateurs du groupe EMATRIZ pour la promotion et le transfert de la méthode TRIZ

Tableau 12 : Autres implications et responsabilités

## ANNEXES

### A - DETAIL DES ENSEIGNEMENTS (1996 / 2006)

Année	Enseignement (intitulé)	Thème	Année (1,2,3,4 ou 5)	Type (C/TD/TP)	Nombre d'heures	Nombre d'élèves
1996	Architecture des Systèmes de Production	Productique	4	cours	10	15
	Méthodes de spécification : SADT et SA-RT	Modélisation et analyse de systèmes	4	cours	14	15
	Réseaux Locaux Industriels	Productique	4	cours	10	15
	Réseaux Locaux Industriels	Productique	4	TP	7	15
	Réseaux de Petri	Modélisation et analyse de systèmes	4	cours	12	15
	Réseaux de Petri	Modélisation et analyse de systèmes	4	TD	8	15
	Réseaux de Petri	Modélisation et analyse de systèmes	4	TP	7	15
	GRAFCET	Automatique discrète	4	cours	10	15
	GRAFCET	Automatique discrète	4	TD	6	15
	GRAFCET	Automatique discrète	4	TP	9	15
	Ordonnancement	Productique	4	cours	10	15
	Ordonnancement	Productique	4	TP	9	15
	Présentation du Modèle Conceptuel de Données BASE-PTA	Productique	3	cours	2	118
	Logique et architecture	Logique	2	TD	4	20
	Automatique	Automatique continue	2	TD	8	35
	Echanges des données techniques	Productique	5	cours	6	12
	GRAFCET	Automatique discrète	2	cours	8	68
	GRAFCET	Automatique discrète	2	TD	4	68
	Automatique continue	Automatique continue	2	TD	4	68

Année	Enseignement (intitulé)	Thème	Année (1,2,3,4 ou 5)	Type (C/TD/TP)	Nombre d'heures	Nombre d'élèves
1997	Architecture des Systèmes de Production	Productique	4	cours	10	15
	Méthodes de spécification : SADT et SA-RT	Modélisation et analyse de systèmes	4	cours	14	15
	Réseaux Locaux Industriels	Productique	4	cours	10	15
	Réseaux Locaux Industriels	Productique	4	TP	7	15
	Réseaux de Petri	Modélisation et analyse de systèmes	4	cours	12	15
	Réseaux de Petri	Modélisation et analyse de systèmes	4	TD	8	15
	Réseaux de Petri	Modélisation et analyse de systèmes	4	TP	7	15
	GRAF CET	Automatique discrète	4	cours	10	15
	GRAF CET	Automatique discrète	4	TD	6	15
	GRAF CET	Automatique discrète	4	TP	9	15
	Ordonnancement	Productique	4	cours	10	15
	Ordonnancement	Productique	4	TP	9	15
	Logique et architecture	Logique	2	TD	4	20
	Automatique	Automatique continue	2	TD	8	35
	Echanges des données techniques	Productique	5	cours	6	12
	1998	Architecture des Systèmes de Production	Productique	4	cours	10
Modélisation d'entreprise		Productique	3	cours	12	160
Modélisation d'entreprise		Productique	3	TD	8	160
Réseaux Locaux Industriels		Productique	4	cours	10	15
Réseaux Locaux Industriels		Productique	4	TP	7	15
Réseaux de Petri		Modélisation et analyse de systèmes	4	cours	12	15
Réseaux de Petri		Modélisation et analyse de systèmes	5	TD	8	15
Réseaux de Petri		Modélisation et analyse de systèmes	4	TP	7	15
GRAF CET		Automatique discrète	4	cours	10	15
GRAF CET		Automatique discrète	4	TD	6	15
GRAF CET		Automatique discrète	4	TP	9	15
Ordonnancement		Productique	4	cours	10	15
Ordonnancement		Productique	4	TP	9	15
Logique et architecture		Logique	2	TD	4	20
Automatique		Automatique continue	2	TD	8	35
1999		Architecture des Systèmes de Production	Productique	4	cours	10
	Modélisation d'entreprise	Productique	3	cours	12	160
	Modélisation d'entreprise	Productique	4	TD	8	160
	Réseaux Locaux Industriels	Productique	4	cours	10	15
	Réseaux Locaux Industriels	Productique	4	TP	7	15
	Réseaux de Petri	Modélisation et analyse de systèmes	4	cours	12	15
	Réseaux de Petri	Modélisation et analyse de systèmes	4	TD	8	15
	Réseaux de Petri	Modélisation et analyse de systèmes	4	TP	7	15
	GRAF CET	Automatique discrète	4	cours	10	15
	GRAF CET	Automatique discrète	4	TD	6	15
	GRAF CET	Automatique discrète	4	TP	9	15
	Modélisation des systèmes d'information pour l'entreprise	Productique	5	cours	10	12
	GRAF CET	Automatique discrète	2	cours	8	68
	GRAF CET	Automatique discrète	3	TD	4	68
	Automatique continue	Automatique continue	2	TD	4	68

Année	Enseignement (intitulé)	Thème	Année (1,2,3,4 ou 5)	Type (C/TD/TP)	Nombre d'heures	Nombre d'élèves
2000	Productique - 2A	Productique	2	Cours	12	160
	Productique - 2A	Productique	2	TD	8	160
	Modélisation de processus - Option	Productique	4	TP	4	15
	Enterprise resource Planning - Option	Productique	4	Cours	4	15
	Enterprise resource Planning - Option	Productique	4	TP	18	15
	GA-GL - 3A	Modélisation et analyse de systèmes	3	Cours	8	160
	GA-GL - 3A	Modélisation et analyse de systèmes	3	Cours	6	80
	GA-GL - 3A	Modélisation et analyse de systèmes	3	TD	6	160
	GA-GL - 3A	Modélisation et analyse de systèmes	3	TD	4	80
	TRIZ - 3A	Modélisation et analyse de problème	3	Cours	12	20
	TRIZ - 3A	Modélisation et analyse de problème	3	TD	6	20
	TRIZ - Option	Modélisation et analyse de problème	4	Cours	9	15
	TRIZ - Option	Modélisation et analyse de problème	4	TD	6	15
	Modèles de données - Institut EERIE	Productique	4	Cours	4	10
2001	Productique - 2A	Productique	2	Cours	12	160
	Productique - 2A	Productique	2	TD	8	160
	Modélisation de processus - Option	Productique	4	TP	4	15
	Enterprise resource Planning - Option	Productique	4	Cours	4	15
	Enterprise resource Planning - Option	Productique	4	TP	18	15
	GA-GL - 3A	Modélisation et analyse de systèmes	3	Cours	8	160
	GA-GL - 3A	Modélisation et analyse de systèmes	3	Cours	6	80
	GA-GL - 3A	Modélisation et analyse de systèmes	3	TD	6	160
	GA-GL - 3A	Modélisation et analyse de systèmes	3	TD	4	80
	TRIZ - 3A	Modélisation et analyse de problème	3	Cours	12	20
	TRIZ - 3A	Modélisation et analyse de problème	3	TD	6	20
	TRIZ - Option	Modélisation et analyse de problème	4	Cours	9	15
	TRIZ - Option	Modélisation et analyse de problème	4	TD	6	15
	Modèles de données - Institut EERIE	Productique	4	Cours	4	10
2002	Productique - 2A	Productique	2	Cours	12	160
	Productique - 2A	Productique	2	TD	12	160
	Enterprise resource Planning - Option	Productique	4	Cours	2	24
	Enterprise resource Planning - Option	Productique	4	TP	20	24
	TRIZ - 3A	Modélisation et analyse de problème	3	Cours	12	20
	TRIZ - 3A	Modélisation et analyse de problème	3	TD	6	20
	TRIZ - Option	Modélisation et analyse de problème	4	Cours	9	24
	TRIZ - Option	Modélisation et analyse de problème	4	TD	6	24
	GA-GL - 3A	Modélisation et analyse de systèmes	3	Cours	8	160
	GA-GL - 3A	Modélisation et analyse de systèmes	3	TD	4	80
	Productique avancée	Productique	4	Cours	4	24
	Productique avancée	Productique	4	TP	8	24

Année	Enseignement (intitulé)	Thème	Année (1,2,3,4 ou 5)	Type (C/TD/TP)	Nombre d'heures	Nombre d'élèves
2003	Productique - 2A	Productique	2	Cours	12	160
	Productique - 2A	Productique	2	TD	12	160
	TRIZ - 3A	Modélisation et analyse de problème	3	Cours	12	20
	TRIZ - 3A	Modélisation et analyse de problème	3	TD	6	20
	TRIZ - Option	Modélisation et analyse de problème	4	Cours	9	24
	TRIZ - Option	Modélisation et analyse de problème	4	TD	6	24
	GA-GL - 3A	Modélisation et analyse de systèmes	3	Cours	8	160
	GA-GL - 3A	Modélisation et analyse de systèmes	3	TD	4	80
	Productique avancée	Productique	4	Cours	4	24
	Productique avancée	Productique	4	TP	8	24
2004	Productique - 2A	Productique	2	Cours	16	160
	Productique - 2A	Productique	2	TD	12	160
	Productique - 2A	Productique	2	TP	4	160
	TRIZ - 3A	Modélisation et analyse de problème	3	Cours	12	20
	TRIZ - 3A	Modélisation et analyse de problème	3	TD	6	20
	TRIZ - Option	Modélisation et analyse de problème	4	Cours	9	24
	TRIZ - Option	Modélisation et analyse de problème	4	TD	6	24
	GA-GL - 3A	Modélisation et analyse de systèmes	3	Cours	8	160
	GA-GL - 3A	Modélisation et analyse de systèmes	3	TD	4	80
	UMII RdP avancés	Modélisation et analyse de systèmes	5	Cours	6	24
	UMII RdP avancés	Modélisation et analyse de systèmes	5	TD	4	24
	Productique avancée	Productique	4	Cours	4	24
	Productique avancée	Productique	4	TP	8	24
	2005	Productique - 2A	Productique	2	Cours	16
Productique - 2A		Productique	2	TD	12	160
Productique - 2A		Productique	2	TP	4	160
TRIZ - 3A		Modélisation et analyse de problème	3	Cours	12	20
TRIZ - 3A		Modélisation et analyse de problème	3	TD	6	20
TRIZ - Option		Modélisation et analyse de problème	4	Cours	9	24
TRIZ - Option		Modélisation et analyse de problème	4	TD	6	24
GA-GL - 3A		Modélisation et analyse de systèmes	3	Cours	8	160
GA-GL - 3A		Modélisation et analyse de systèmes	3	TD	4	80
UMII RdP avancés		Modélisation et analyse de systèmes	5	Cours	6	24
UMII RdP avancés		Modélisation et analyse de systèmes	5	TD	4	24
UM II : Temps réel		Modélisation et analyse de systèmes	5	Cours	10	20
UM II : Temps réel		Modélisation et analyse de systèmes	5	TD	10	20
U. de Savoie : Vérification et Validation de SI, approches formelles		Modélisation et analyse de systèmes	5	Cours	12	15
U. de Savoie : Vérification et Validation de SI, approches formelles		Modélisation et analyse de systèmes	5	TP	8	15
Productique avancée		Productique	4	Cours	4	24
Productique avancée		Productique	4	TP	8	24
2006		Productique - 2A	Productique	2	Cours	16
	Productique - 2A	Productique	2	TD	12	160
	Productique - 2A	Productique	2	TP	4	160
	TRIZ - 3A	Modélisation et analyse de problème	3	Cours	10	20
	TRIZ - 3A	Modélisation et analyse de problème	3	TD	8	20
	TRIZ - Option	Modélisation et analyse de problème	4	Cours	9	24
	TRIZ - Option	Modélisation et analyse de problème	4	TD	6	24
	GA-GL - 3A	Modélisation et analyse de systèmes	3	Cours	8	55
	GA-GL - 3A	Modélisation et analyse de systèmes	3	TD	4	55
	UMII RdP avancés	Modélisation et analyse de systèmes	5	Cours	10	24
	UMII RdP avancés	Modélisation et analyse de systèmes	5	TD	4	24
	U. de Savoie : Vérification et Validation de SI, approches formelles	Modélisation et analyse de systèmes	5	Cours	10	15
	Productique avancée	Productique	4	Cours	4	24
	Productique avancée	Productique	4	TP	8	24

**B - COPIE D'ARTICLES**

Cinq articles ont été choisis dans la liste donnée pages 111 à 118 pour attester de la politique de publication. Une copie est donnée dans la suite. Ce sont :

<i>Ref.</i>	<i>Auteurs, titre, nom du congrès ou du journal</i>
<b>RI1</b>	B. Kamsu-Foguem, V.Chapurlat, Requirements Modelling and Formal Analysis using Graph Operations, IJPR International Journal of Production Research, TPRS vol 44 issue 17, 2006
<b>RI2</b>	V. Chapurlat, B. Kamsu-Foguem, F. Prunet, A Formal Verification Framework and Associated Tools for Enterprise Modeling: Application to UEML, Computers in Industry, Novembre 2005
<b>RI3</b>	V. Chapurlat, B. Kamsu-Foguem, F. Prunet, Enterprise model verification and validation: an approach, Annual Review in Control, Volume 27, Issue 2, pages 185-197, 2003
<b>CI3</b>	V.Chapurlat, C.Braesch, Verification, Validation and Accreditation of Enterprise Models, INCOM 2006, 12th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing, Saint Etienne, France
<b>CI6</b>	V.Chapurlat, S.Aloui, How to detect risks with a formal approach? From property specification to risk emergence, MSVVEIS 2006, Modeling, Simulation, Verification and Validation of Enterprise Information Systems, Paphos, Cyprus, Mai 2006