



HAL
open science

Préconception de produits

Bernard Yannou

► **To cite this version:**

Bernard Yannou. Préconception de produits. Sciences de l'ingénieur [physics]. Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 2001. tel-00011951

HAL Id: tel-00011951

<https://theses.hal.science/tel-00011951v1>

Submitted on 14 Mar 2006

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

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

INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE GRENOBLE

N° attribué par la bibliothèque

|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|

MEMOIRE D'HABILITATION A DIRIGER DES
RECHERCHES

DISCIPLINE : MECANIQUE

Préconception de Produits

Préparé et présenté au
Laboratoire Productique-Logistique de l'Ecole Centrale Paris

Par

Bernard Yannou

le 29 juin 2001 devant le jury composé de

Patrick Chedmail	EC Nantes / IRCCYN	Rapporteur
Olivier Garro	UTBM / M3M	Rapporteur
Michel Tollenaere	INPG / GILCO	Rapporteur
Russel Barton	Penn State University, USA	
Jean-Claude Bocquet	EC Paris / PL	
Philippe Deshayes	EC Lille	
Jacques Perrin	INSA de Lyon / ICTT	

Nous étions autrefois en contact avec une usine compliquée. Mais aujourd'hui nous oublions qu'un moteur tourne. Il répond enfin à sa fonction qui est de tourner, comme un cœur qui bat, et nous ne prêtons point, non plus, attention à notre cœur. Cette attention n'est plus absorbée par l'outil. Au-delà de l'outil, et à travers lui, c'est la vieille nature que nous retrouvons, celle du jardinier, du navigateur, ou du poète.

Antoine de Saint-Exupéry, *Terre des Hommes* (1939)

Table des matières

1. Positionnement rapide.....	12
1.1 Curriculum Vitae.....	12
1.2 Démarche et positionnement en recherche.....	13
1.3 Publications scientifiques.....	15
1.3.1 Revues internationales avec comité de lecture.....	16
1.3.2 Chapitres d'ouvrage.....	16
1.3.3 Colloques internationaux avec comité de lecture.....	18
1.3.4 Publications scientifiques autres.....	19
1.3.5 Vulgarisation scientifique.....	20
1.4 Encadrement scientifique.....	21
1.4.1 Encadrement des thèses.....	21
1.4.2 Encadrement des DEA.....	22
2. Préconception de produits.....	25
2.1 Introduction à la conception préliminaire.....	25
2.2 Définition fonctionnelle de nos axes de recherche.....	26
2.3 Contexte international de la recherche.....	29
2.3.1 Une classification pour la préconception de produits.....	29
2.3.2 Le domaine de l'intelligence artificielle appliquée à la conception.....	32
2.3.2.1 Présentation.....	32
2.3.2.2 Modélisation et raisonnements fonctionnels en IA.....	33
2.3.2.3 Physique et mécanique qualitative.....	34
2.3.2.4 Conception basée sur les cas.....	39
2.3.2.5 Programmation par contraintes.....	40
2.3.3 Le domaine de la conception intégrée et simultanée en ingénierie mécanique.....	42
2.3.3.1 Modèles de produits et de processus.....	42
2.3.3.2 Préconception de mécanismes.....	43
2.3.4 Le domaine des « design theories and methodologies ».....	45
2.3.4.1 Présentation.....	45
2.3.4.2 Les théories générales.....	46
2.3.4.3 L'évaluation multi-critère de solution.....	47
2.3.4.4 La représentation de l'imprécision en préconception.....	48
2.3.4.5 Le lien entre paramètres de conception, performances et besoins.....	50
2.3.5 Le domaine des méthodologies industrielles de conception.....	54
2.4 Contexte national de la recherche.....	58
2.5 Contexte personnel de la recherche.....	60
2.5.1 Historique de nos recherches.....	60
2.5.2 Positionnement des thèses encadrées par rapport à nos axes de recherche.....	61
2.5.3 Bilan des méthodes scientifiques utilisées.....	61
2.5.4 Bilan des spécificités de nos travaux.....	62
3. Contenu de nos travaux.....	66
3.1 Description des thèses encadrées.....	66
3.2 Description des DEA encadrés.....	73
3.3 Description des sujets de recherche.....	75
3.3.1 L'axe « représentation et raisonnements fonctionnels ».....	75
3.3.2 L'axe « Raisonnements sur des modèles incomplets ».....	80
3.3.3 L'axe « conception collaborative en préconception ».....	97

4. Rayonnement scientifique.....	102
4.1 Groupes de recherche.....	102
4.1.1 Le groupe de recherche en raisonnement qualitatif.....	102
4.1.2 Le groupement Priméca.....	103
4.1.3 L'Association Française pour l'Analyse de la Valeur.....	103
4.2 Coopérations industrielles	106
4.3 Valorisation de la recherche	106
4.4 Activités scientifiques administratives et organisationnelles	108
4.4.1 Relecture d'articles pour colloques et revues.....	108
4.4.2 Membre de jury de thèse	109
4.4.3 Le DEA et le laboratoire PL.....	109
4.5 Distinctions scientifiques.....	109
5. Orientations de notre recherche	111
5.1 Cadre général de l'évolution des recherches.....	111
5.2 Extension de SPEC à des modèles de coûts	113
5.3 Extension de SPEC à des modèles de risques.....	114
5.4 Extension de SPEC à la gestion de projet.....	114
5.5 Opérationnalisation de la valeur	115
5.6 Modèles conceptuels d'évaluation de performances acoustiques.....	116
5.7 Prototypage virtuel de concept.....	121
5.8 Optimisation de produits difficilement évaluables	123
5.9 Domaines et théories scientifiques à approfondir.....	123
6. Enseignement	124
6.1 Activités d'enseignement.....	124
6.1.1 Formation initiale	124
6.1.2 DEA de Génie des Systèmes Industriels	126
6.2 Responsabilités pédagogiques.....	129
6.3 Publications à caractère pédagogique.....	129
7. Annexes.....	132
7.1 Quelques programmes détaillés de modules de cours	133
7.1.1 Module « Analyse des processus d'innovation »	133
7.1.2 Module « Analyse Fonctionnelle, Analyse des Valeurs ».....	134
7.1.3 Module « Conception des produits et services ».....	135
7.1.4 Module « Conception Assistée par Ordinateur »	136
7.1.5 Module « Valeur et performance en conception »	137
7.2 Présentation du CRIC	138
7.3 Charte de la liste de diffusion VAFORE	140
7.3.1 Thématique du réseau.....	140
7.3.2 Objectifs détaillés.....	141
7.3.3 Animation du réseau.....	143
7.4 Sommaire du numéro Management par la Valeur de la revue RFGI	144
7.5 Publications de type bibliographie – état de l'art.....	146
7.5.1 Les méthodes de synthèse en préconception	146

7.5.2	La préconception de produits en Physique Qualitative	148
7.5.3	Les modèles fonctions-structure-comportements.....	150
7.5.4	Une méthode privilégiée de modélisation et de résolution en préconception : la Programmation Par Contraintes	152
7.6	Publications sur travaux de recherche	154
7.6.1	Synthèse et optimisation dans l'espace des topologies en allocation spatiale.....	154
7.6.2	Synthèse dimensionnelle de mécanismes par réseau de neurones.....	156
7.6.3	Conception collaborative de mécanismes par une approche multi-agents	158
7.6.4	Modèle de simulation et d'optimisation qualitative de concept de mécanisme.....	160
7.6.5	Méthode de modélisation des objectifs et de suivi de performances en préconception : SPEC	162
7.6.6	Méthode de pondération coopérative d'objectifs : le Tri Croisé de Monté-Carlo.....	164
7.6.7	Vers le prototypage virtuel de concept par la modélisation avancée de performances et d'objectifs.....	166
7.7	Notre bibliographie	168
7.8	Bibliographie autre.....	172

Table des Figures

Figure 1 : Positionnement de nos axes de recherche relativement aux étapes de préconception de produits	15
Figure 2 : L'encadrement des thèses.....	21
Figure 3 : Les deux dimensions de la préconception	51
Figure 4 : Conception classique.....	52
Figure 5 : Préconception avec mapping direct performances/préférences.....	52
Figure 6 : Préconception avec double mapping direct performances/préférences et besoin/faisabilité. 53	
Figure 7 : Préconception avec double mapping inverse	53
Figure 8 : L'analyse fonctionnelle et l'analyse de la valeur selon Teixido et al [Rak et al 1990; Teixido et al 1995]	55
Figure 9 : Les fonctions des modèles et méthodes en préconception de produits.....	62
Figure 10 : Diagramme fonctionnel dans Archiplan.....	76
Figure 11 : Une solution topologique (concept) dans Archiplan	76
Figure 12 : Les modèles d'évaluation d'investissements et de performances et de satisfaction au dessus du modèle d'objectifs de ODISAI.....	78
Figure 13 : Exemple de la modélisation dans SPEC d'un critère d'appréciation en (a) et d'une performance de solution correspondante en (b)	79
Figure 14 : QDES : la fonctionnalité majeure d'intersection des spécif. comportementales qualitatives et du concept de système physique.....	80
Figure 15 : Notre modèle de cinématique qualitative est capable de générer des explications sur le phénomène de palier d'immobilité (b) sous la forme de propriétés symboliques (a) vérifiées par les paramètres dimensionnels.....	81
Figure 16 : Qualité de l'optimisation dimensionnelle d'un mécanisme à partir de notre modèle de cinématique qualitative	81
Figure 17 : Réalisme : Deux exemples de superposition de trajectoires spécifiées et de trajectoires générées par les mécanismes synthétisés	82
Figure 18 : Réalisme : Principe de synthèse topologique et dimensionnelle de mécanismes plans par raisonnement basé sur des cas qualitatifs.....	83
Figure 19 : Index d'une trajectoire qualitative	83
Figure 20 : Exemples de dépliages de graphes avec l'algorithme TGU : (a) Exemple extrait de la thèse de Yannou [40], (b) et (c) Représentation cinématique d'un mécanisme à barres et de son graphe topologique (composants-connections) extraite de la thèse de Vasiliu [Vasiliu 1997].....	84
Figure 21 : (a) Classiquement en allocation spatiale, l'énumération exhaustive des sol. géométriques (b) Dans Archiplan, il existe une énumération topologique préalable.....	85
Figure 22 : Les collecteurs des sol. topologiques et des meilleures sol. géométriques correspondantes	86
Figure 23 : La méthode d'optimisation d'ODISAI.....	87
Figure 24 : La méthode de simulation d'ODISAI	87
Figure 25 : Courbe de atisfaction du projet dans ODISAI.....	88
Figure 26 : Courbe d'investissement dans une action de flexibilité dans ODISAI	88
Figure 27 : (a) Paramétrage du mécanisme 4-barres (b) Répartition de l'action des agents sur une partie des paramètres	91
Figure 28 : Les trois phases d'utilisation de SPEC 1) Modélisation du CdCF enrichi 2) Estimation des perfo. de concepts 3) Simulations	93
Figure 29 : SPEC : comparaison des indicateurs de réussite du projet entre 4 concepts de solution....	93
Figure 30 : SPEC : La tableau de bord des risques et des probabilités de satisfaction pour toutes les fonctions de l'arbre fonctionnel.....	93
Figure 31 : Principe d'optimisation de la lampe de bureau	94
Figure 32 : Cinématique de la lampe de bureau.....	94
Figure 33 : Modèle d'origine	95
Figure 34 : Métamodèle global	95
Figure 35 : Métamodèles continus et logique d'origine.....	95
Figure 36 : Métamodèles continus et métamodèle de la logique	95
Figure 37 : Méthode TCMC : (a) Matrice des comparaisons binaires.....	98
Figure 38 : (b) Résultats : poids entachés d'incertitude et voies d'amélioration de la cohérence	98
Figure 39 : Le site Web de VAFORE sur egroups.fr	105
Figure 40 : Interface utilisateur du logiciel de Tri Croisé de Monté-Carlo dans sa version commerciale	107
Figure 41 : Le clavier ergonomique ECP (a) Modèle CAO, (b) Dessin du brevet PCT, (c) Prototype	108

Figure 42 : Le rôle d'un modèle conceptuel d'évaluation de performances acoustiques	118
Figure 43 : Stratégies d'élaboration de modèles conceptuels d'évaluation de performances acoustiques	119
Figure 44 : Recherche de stratégie de métamodélisation	121
Figure 45 : Exploration du concept de lampe de bureau par visualisation rapide au dessus d'un métamodèle	122
Figure 46 : Extrait du projet de recherche de Barton et Simpson [Barton et al 2000b]	122
Figure 47 : Le serveur du clavier ergonomique ECP	130
Figure 48 : Exemples de maquettes réalisées au CRIC de l'ECP	138

Table des Tableaux

Tableau 1 : Libellé et caractéristiques administratives des thèses encadrées et de notre thèse	22
Tableau 2 : Libellé des DEA encadrés	23
Tableau 3 : Quelques revues d'intérêt dans nos domaines de recherche	30
Tableau 4 : Quelques colloques d'intérêt dans nos domaines de recherche	31
Tableau 5 : Positionnement des thèses encadrées et de notre thèse par rapport à nos axes et sujets de recherche	61
Tableau 6 : Méthodes scientifiques que nous avons utilisées pour répondre aux fonctions en préconception de produit	63
Tableau 7 : Détail des sujets de DEA encadrés	73
Tableau 8 : Les sujets de recherche actuels et futurs dans l'axe A	112
Tableau 9 : Les sujets de recherche actuels et futurs dans l'axe B	113
Tableau 10 : Modules de cours en formation initiale	126
Tableau 11 : Modules de cours en DEA de Génie des Systèmes Industriels des Ecole Centrale Paris, Lille et Lyon	129
Tableau 12 : Détail du module « Analyse des processus d'innovation » dans la future option Génie Industriel (2001-2002)	133
Tableau 13 : Détail du module « Analyse Fonctionnelle, Analyse des Valeurs » dans la future option Génie Industriel (2001-2002)	134

Fiches de thèse

Fiche de thèse 1	67
Fiche de thèse 2	68
Fiche de thèse 3	69
Fiche de thèse 4	69
Fiche de thèse 5	71
Fiche de thèse 6	72

Note au lecteur

Ce mémoire est constitué de 3 grandes parties :

- Le **chapitre 1** permet au lecteur de se faire une idée rapide de nos travaux de recherche.
- Les chapitres suivants sont plus détaillés en ce qui concerne un état de l'art sur la préconception de produits (**chapitre 2**), une description détaillée de nos travaux de recherche (**chapitre 3**), notre rayonnement scientifique (**chapitre 4**), l'orientation de nos recherches (**chapitre 5**) et enfin nos activités et responsabilités d'enseignement (**chapitre 6**).
- Les annexes sont principalement constituées de deux parties :
 - Des publications de type état de l'art (**chapitre 7.5**),
 - Des publications majeures (**chapitre 7.6**) présentant les modèles et méthodes issus de nos travaux de recherche.

Nous avons pris le parti de scinder notre thème de recherche en axes de recherche et les axes de recherche en sujets de recherche. Chaque thèse encadrée se retrouve ainsi dans un, deux ou trois sujets de recherche, ce qui présente l'avantage de pouvoir se focaliser sur un modèle de représentation ou sur une méthode de raisonnement pour en voir l'originalité. Si le lecteur se trouvait dérouté, il est invité à lire à la suite les descriptifs de sujets de recherche se rapportant à une même thèse.

En ce qui concerne les références à des travaux scientifiques dans le texte, nous avons choisi :

- de numéroter entre crochets celles correspondant à **nos publications** : [1, **3**, 23, 25, 26], la notation en gras ou le double liseré dans la marge signifiant que la publication correspondante est reproduite en **annexe**,
- de référencer **les autres publications** par le nom et la date du (des) contributeur(s) : [Medjdoub 1996]
- de noter A, B et C nos 3 **axes de recherche**,
- d'utiliser des parenthèses pour nos **sujets de recherche** : avec des numéros pour les 19 sujets passés (1, 10) et des lettres minuscules pour les 7 sujets futurs (b, d).
- de numéroter les **fiches de thèse** : Fiche de thèse 2.


Bernard Yannou, Ecole Centrale Paris, le 9 mai 2001.

Je remercie Jean-Claude Bocquet qui m'a appris le métier de chercheur et qui m'a aidé à trouver ma voie au fil de ces dix années qui sont donc aussi des années de « recherche personnelle ».

1. Positionnement rapide

1.1 Curriculum Vitae

Etat-civil

<p>36 ans, né le 28 décembre 1964 à Quimper (Finistère, 29) Divorcé, 2 enfants (9 et 11 ans)</p> <p>Actuellement, Maître de Conférences (1^{ère} classe, 2^{ème} échelon) , section 60, à l'Ecole Centrale Paris, Laboratoire Productique-Logistique, Grande Voie des Vignes, 92295 Chatenay-Malabry Tel (33 1) 41 13 16 05 - Fax (33 1) 41 13 12 72 Site du labo PL : http://www.pl.ecp.fr</p>	
--	---

Cursus

Juin 83	Baccalauréat C à Maubeuge (Nord, 59)
Sept 83 - juin 85	Classes de Mathématiques Supérieures et Spéciales Technologiques au Lycée Baggio de Lille
Sept 85 - sept 89	Elève de l' Ecole Normale Supérieure de Cachan (ENSC) option Mécanique
Juin 1986	Licence de Technologie de la Construction option Conception des Systèmes Mécaniques de PARIS VI (A-Bien)
Juin 1987	Maitrise (Bien)
Juin 1988	Agrégation de Mécanique 1988 (5 ^{ème})
Sept 88 - sept 89 (4 ^{ème} année ENS Cachan)	DEA d'informatique IARFAG de l'ENSTA/Paris 6/Mines de Paris, option CAO-Algorithmique Graphique Mastère Innovation Conception Production de l'Ecole Centrale Paris
Oct 89 - Oct 90	Service National dans le cadre des Professeurs Scientifiques du Contingent au CEA de Saclay. Intégration au corps enseignant de la Section des Enseignements de Neutronique et d'Electro-nucléaire (SENE) de l'institut d'enseignement du CEA : l'INSTN (Institut National des Sciences et Techniques du Nucléaire)
Oct 90 - sept 93	Thèse de doctorat : Inscription administrative à l'ENS Cachan Détachement scientifique au sein du laboratoire Productique-Logistique sous la responsabilité scientifique de Jean-Claude BOCQUET Allocataire Moniteur Normalien (A.M.N.) enseignant à l'Ecole Centrale Paris
Sept 93- sept 95	Chef de Travaux à l'ECP (détachement de l'agrégation)
Depuis sept 95	Maître de Conférences (section 60) à l'Ecole Centrale Paris. Actuellement, 1 ^{ère} classe, 2 ^{ème} échelon - Enseignement en : Conception de produits, Conception Assistée par Ordinateur, Analyse Fonctionnelle, Cahier des Charges Fonctionnel, Analyse de la Valeur, méthodologies projets, Mécanique Générale, Théorie des Mécanismes, Innovation - Responsable adjoint de l'option de 3 ^{ème} année ICP (Innovation Conception Production), Responsable de l'option IPS : « <i>Ingénierie de développement des Produits et Systèmes</i> » du DEA de Génie des Systèmes Industriels des Ecole Centrale Paris, Lille, Lyon - Au sein du laboratoire Productique-Logistique de l'ECP, animateur du thème de recherche sur les « <i>Méthodologies de préconception de produits</i> ». Au sein de Centrale-GI, animateur de la thématique de recherche n°1 intitulée

1.2 Démarche et positionnement en recherche

De formation professeur agrégé de mécanique (ancien élève de l'Ecole Normale Supérieure de Cachan), nous avons profité de la 4^{ème} année à l'ENS pour effectuer un DEA d'informatique (ENSTA/Paris 6/Mines de Paris), chose peu usuelle relativement à notre formation initiale. Nous avons déjà dans l'idée de nous consacrer à utiliser l'informatique au service de la mécanique. L'informatique pour la mécanique n'était pas un but en soi, ce qui nous intéressait encore plus c'était de savoir comment pouvaient être conçus des produits orientés clients que l'entreprise sache industrialiser et commercialiser de manière profitable. Cette ouverture complémentaire, nous l'avons trouvée en effectuant un mastère de type Génie Industriel à l'Ecole Centrale de Paris.

Dès lors, nous avons voulu nous intéresser au cours d'une thèse (de 90 à 93)¹ au problème de la *conception de produits dans les phases préliminaires*. Pour plus de commodité, nous l'appellerons *préconception de produits*, se trouvant dans la littérature sous l'expression de *conceptual design*². A ce stade de la conception, seules des architectures ou *concepts* de produits sont disponibles et les outils de simulation et de dimensionnement de nos ingénieurs sont presque toujours inopérants puisque la phase de conception détaillée n'a pas encore eu lieu et que la science analytique développée depuis 3 siècles ne sait souvent prédire qu'à partir de modèles suffisamment définis et quantifiés.

Cette thèse nous a fait plonger dans :

- les techniques d'Intelligence Artificielle du type : physique qualitative, programmation par contraintes, raisonnement à base de cas, logique floue, réseaux de neurones...
- et dans des problématiques de Génie Industriel du type : ingénierie simultanée et concourante, *design for X (manufacturing, assembly, etc, c'est-à-dire concevoir en anticipant des contraintes)*, prototypage virtuel (ou maquette numérique), théories de la conception, optimisation...

Depuis lors, nous avons été deux ans chef de travaux puis, depuis six années, Maître de Conférences en section 60 à l'Ecole Centrale Paris au sein du laboratoire Productique-Logistique (6 enseignants-chercheurs, 25 doctorants). Le thème de recherche de ce laboratoire, qui a trait au Génie Industriel et aux industries essentiellement manufacturières (et de service parfois), concerne la modélisation de processus associés à la conception, à la production et à la logistique, appliquée plus particulièrement aux :

- processus et **méthodologies** de développement de produits et de systèmes,
- processus de gestion optimale des flux,
- processus de soutien logistique intégré,
- processus de capitalisation des connaissances et des expériences.

¹ Inscription administrative à l'ENS Cachan mais détachement au sein du laboratoire Productique-Logistique de l'Ecole Centrale Paris. Directeur de thèse Jean-Claude BOCQUET.

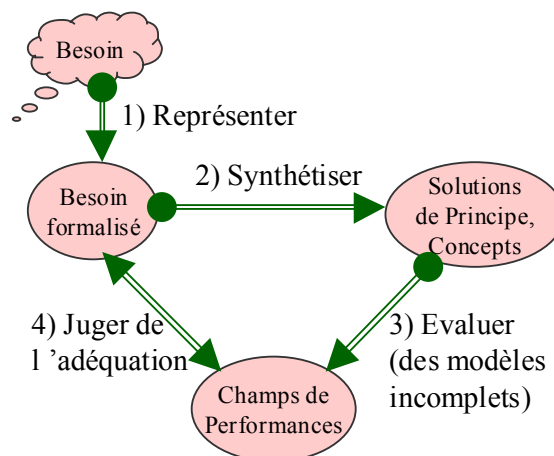
² Nous avons pleinement conscience que *Préconception* est un néologisme peu usité. Nous le préférons à *Conception préliminaire* qui a en français une connotation différente. Nous préférons bien entendu *Conceptual Design* qui a un sens précis dans la communauté internationale des chercheurs, et nous n'hésiterons pas parfois à l'utiliser dans notre document.

Ce laboratoire se caractérise notamment par le fait que ces travaux de recherche débouchent souvent sur des modèles et outils informatisés (outils d'aide à la décision, bases de connaissances, outils supports de gestion de projet, algorithmes d'optimisation de flux...).

Dans cette mouvance, nous pouvons caractériser notre approche de plutôt « dure » en méthodologie de conception (sans jugement de valeur) avec le développement de *modèles de représentation* opérationnels en informatique et de *méthodes de raisonnement* opérant sur ces modèles. De ce fait, **les aspects humains ne sont pas pris en compte dans nos travaux**. Nous n'avons pas travaillé sur les **aspects ontologiques et cognitifs de la conception**. De plus, nous n'avons pas contribué à modéliser **les processus de préconception** (au niveau de leurs aspects temporel, ressources matérielles et compétences humaines), bien que prenant parfois en compte la séquentialité des actions et la collaboration des acteurs. **Nous n'avons pas non plus développé de modèle de produit poussé.**

En définitive, seule la logique « produit » de la préconception nous a intéressés.

Ainsi, plutôt que des modèles d'organisation, de compétences, de processus ou de produits, ce sont les **modèles d'objectifs et de satisfactions**³ qui nous ont intéressés (point 1 de la **Figure 1**). Nous nous sommes aussi penchés sur la façon de traduire ces objectifs de produit en *concepts* (architectures, solutions de principe, voir point 2) de manière la plus automatisée qui soit : par des méthodes de **synthèse**, ou par des méthodes semi-automatiques qui, loin de prendre la place des concepteurs, leur permettent au contraire de disposer d'outils de conception génériques leur donnant les moyens de se consacrer à des tâches de créativité. Lorsque les concepts ont été générés, il faut savoir **évaluer leurs performances** (point 3), la difficulté résidant dans leur définition grossière, dans leur aptitude à représenter des classes entières de produits solutions. Enfin, nous nous sommes intéressés à la mesure de **l'adéquation des performances d'un concept avec le besoin** (point 4), de manière à développer des fonctionnalités de suivi des performances, des coûts et des risques dans la phase de préconception, ainsi que des fonctionnalités d'aide à la reconception et à l'optimisation des *concepts* en prenant toutefois en compte les implications majeures sur le projet. La **Figure 1** représente donc bien un synoptique représentatif de nos activités de recherche.



³ On trouve aussi *modèles d'agrégation de préférences*

Figure 1 : *Positionnement de nos axes de recherche relativement aux étapes de préconception de produits*

Notre champs d'applications a été majoritairement celui des **mécanismes plans**, de **l'allocation spatiale** et surtout celui des **produits génériques** de par nos travaux de thèse portant sur des méthodes génériques d'évaluation de performances comportementales de *concepts* (point 3) ainsi que par nos travaux récents portant sur l'adéquation des performances de *concepts* avec le besoin en phase de préconception (point 4).

De plus, nous avons toujours tenu à développer un maximum de **liens avec les méthodologies industrielles de conception de produits comme l'Analyse de la Valeur** (au niveau des indicateurs de performance, de valeur et des indicateurs de « bonne conception » et de reconception).

Le lecteur trouvera des compléments portant sur la pratique de notre recherche :

- au **chapitre 2** : une présentation de notre thème de recherche et un positionnement de nos recherches sur un plan international, national, et personnel,
- au **chapitre 3** : une description détaillée de nos travaux de recherche : thèses encadrées et sujets de recherche,
- au **chapitre 4** : des considérations de rayonnement scientifique au sens large,
- au **chapitre 5** : les orientations futures de nos recherches sous la forme de 7 sujets de recherche.

1.3 Publications scientifiques

Ce chapitre présente et commente succinctement les publications scientifiques effectuées. Nous utilisons la classification usuelle suivante :

- Revues internationales avec comité de lecture,
- Chapitres d'ouvrage,
- Colloques internationaux avec comité de lecture,
- Publications scientifiques autres (comprenant les revues nationales avec comité de lecture, les revues techniques avec comité de lecture, les colloques nationaux avec comité de lecture)
- Vulgarisation scientifique.

Les publications suivantes ne seront pas citées dans le document :

- celles des colloques ou revues sans comité de lecture (c'est-à-dire sélectionnant sur simple résumé),
- celles présentant un doublon, comme par exemple une publication dans un colloque qui est sélectionnée pour en faire un chapitre d'ouvrage. La publication dans l'ouvrage est alors privilégiée et celle du colloque n'est pas considérée.
- les publications à caractère pédagogique qui sont citées ultérieurement dans le **chapitre 6.3**, page 129.

1.3.1 Revues internationales avec comité de lecture

- [1] ⁴**Medjdoub B., Yannou B.** (2001), *Dynamic Space Ordering at a Topological Level in Space Planning*. **Artificial Intelligence in Engineering**, vol. 15(1), january 2001, p. 47-60.
- [2] ⁵**Vasiliu A., Yannou B.** (2001), *Dimensional Synthesis of Planar Mechanisms Using Neural Networks: Application to Path Generator Linkages*. **Mechanism and Machine Theory**, vol. 36(2), february 2001, p. 299-310.
- [3] ⁶**Medjdoub B., Yannou B.** (2000), *Separating Topology and Geometry in Space Planning*. **Computer Aided-Design**, vol. 32(1), january 2000, p. 39-61.
- [4] ⁷**MQ&D** : Bourseau P., Bousson K., Dague P., Dormoy J.-L., Evrard J.-M., Guerrin F., Leyval L., Lhomme O., Lucas B., Missier A., Montmain J., Piera N., Rakoto-Ravalontsalama N., Steyer J.P., Tomasena M., Travé-Massuyès L., Vescovi M., Xanthakis S., Yannou B. (1995), *Qualitative Reasoning: A Survey of Techniques and Applications* (B. Yannou: *Chap 4.3. Kinematic Analysis and Spatial Reasoning*). **AI-COM: Artificial Intelligence Communications**, vol. 8(3-4), p. 119-192 (B. Yannou wrote 169-174 and 146-147).

1.3.2 Chapitres d'ouvrage

- [5] **Limayem F., Yannou B.** (1999), *Towards a need satisfaction oriented computer aided design*, in *Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering*, J.-L. Batoz, P. Chedmail, G. Cognet and C. Fortin Editors, Kluwer Academic Publishers: Dordrecht/Boston/London, ISBN 0-7923-6024-9, p. 489-496.
- [6] ⁸**Chedmail P., Damay T., Yannou B.** (1999), *A cooperative approach in mechanism design*, in *Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering'98*, J.-L. Batoz, P. Chedmail, G. Cognet and C. Fortin Editors, Kluwer Academic Publishers: Dordrecht/Boston/London, ISBN 0-7923-6024-9, p. 241-248.

⁴ Cette publication concerne spécifiquement l'algorithme de la *méthode de synthèse* topologique en allocation spatiale Archiplan. Voir aussi la **Fiche de thèse 2** en page 68, ou les sujets de recherche **(1)** en page 76 et **(10)** en page 85.

⁵ Cette publication concerne la méthode de synthèse dimensionnelle de mécanisme par réseau de neurones. Elle est reproduite en **annexe 7.6.2**. Voir aussi le sujet de recherche **(7)** en page 82 ou même la **Fiche de thèse 3** en page 69.

⁶ Cette publication concerne la méthode de synthèse topologique en allocation spatiale Archiplan, dans sa globalité et dans la comparaison de ses résultats avec les autres approches de la littérature. Cette publication est reproduite en **annexe 7.6.1**.

⁷ Cette publication a été rédigée par une vingtaine d'auteurs du groupe de travail français en Physique Qualitative MQ&D (voir **chapitre 4.1.1** en page 102). Nous avons contribué à hauteur de 8 pages sur un total de 73 sur un thème dont nous étions le seul maître d'oeuvre et qui portait sur la partie mécanique, à savoir : la *simulation cinématique qualitative* et le *raisonnement spatial en physique qualitative*.

⁸ Publication reproduite en **annexe 7.6.3**. Voir aussi les sujets de recherche **(13)** en page 91 et **(18)** en page 99.

- [7] **Yannou B.** (1998), *Chapitre 3 : Analyse de la Valeur*, in *Conception de produits mécaniques : méthodes, modèles et outils*, M. Tollenaere Editor, Hermes, ISBN 2-86601-694-7, p. 77-104.
- [8] ⁹**Yannou B.** (1998), *Chapitre 19 : Les apports de la programmation par contraintes en conception*, in *Conception de produits mécaniques : méthodes, modèles et outils*, M. Tollenaere Editor, Hermes, ISBN 2-86601-694-7, p. 457-486.
- [9] ¹⁰**Yannou B., Vasiliu A.** (1998), *Chapitre 15.2 : Typologie des approches de synthèse dimensionnelle de systèmes mécaniques. Application aux générateurs de trajectoire*, in *Conception de produits mécaniques : méthodes, modèles et outils*, M. Tollenaere Editor, Hermes, ISBN 2-86601-694-7, p. 348-364.
- [10] ¹¹**Yannou B.** (1997), *Chapitre 10 : Aide à la Conception de Systèmes Physiques*, in *Le raisonnement qualitatif pour les sciences de l'ingénieur*, L. Travé-Massuyès, P. Dague et F. Guerrin Editeurs, Hermes : Paris, ISBN 2-86601-611-4, p. 325-337 et 347-357.
- [11] ¹²**Pailès N., Yannou B., Bocquet J.-C.** (1997), *Manufacturing Flexibility: a New Evaluation*, in *Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering*, P. Chedmail, J.-C. Bocquet and D. Dornfeld Editors, Kluwer Academic Publishers: Dordrecht/Boston/London, ISBN 0-7923-4739-0, p. 71-80.

Trois publications [5, 6, 11] ont été faites dans deux ouvrages de Kluwer Academic Publishers ; elles sont issues des meilleures publications des colloques internationaux IDMMME¹³. A ce titre, elles ont subi deux sélections consécutives par deux relecteurs d'un comité scientifique international¹⁴. Ces publications concernent :

- Une approche de mesure de la performance de la flexibilité d'une unité de production [11],
- Un cadre de prototypage virtuel ou d'optimisation de *concept* de solution [5],
- Une méthode d'optimisation dimensionnelle de mécanisme plan par collaboration d'agents [6]. Cette approche est propre à l'équipe de Patrick Chedmail du laboratoire Ircyn de l'École Centrale de Nantes, nous y avons simplement contribué.

Les ouvrages nationaux auxquels nous avons contribué sont :

- un ouvrage de référence chez Hermès en conception de produits mécaniques, effectué dans le cadre du groupement Priméca. Il s'agit des références [7, 8, 9] totalisant 84 pages sur 550 (voir aussi **chapitre 4.1.2**, page 103),
- un ouvrage de référence chez Hermès en physique qualitative [10] effectué dans le cadre du groupement MQ&D (voir aussi **chapitre 4.1.1**, page 102),

⁹ Publication reproduite en **annexe 7.5.4**.

¹⁰ Publication reproduite en **annexe 7.5.1**. Voir aussi le sujet de recherche **(12)** en page 89.

¹¹ Publication reproduite en **annexe 7.5.2**. Voir aussi les sujets de recherche **(5)** en page 80 et **(6)** en page 81.

¹² Voir la **Fiche de thèse 4** en page 69.

¹³ *International Conference on Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering*

¹⁴ La sélection a été exactement de 50% des communications du colloque

1.3.3 Colloques internationaux avec comité de lecture

Nous référençons ici 18 colloques internationaux avec comité de lecture qui n'ont pas fait l'objet d'autre publication.

- [12] ¹⁵**Meckesheimer M., Barton R.R., Limayem F., Yannou B.** (2000), *Metamodeling of Combined Discrete/Continuous Responses*. in *DTM'00: Design Theory and Methodology*, ASME, Baltimore, Paper No. DETC2000/DTM-14573.
- [13] ¹⁶**Bacha R., Yannou B.** (2000), *New Approach for Building an Integrated Information System for Manufacturing Engineering Departments*. in *MIM2000: IFAC Symposium on Manufacturing, Modeling, Management and Supervision*, Patras, Greece.
- [14] **Bacha R., Yannou B.** (2000), *Guideline for Technical Data Integration in Manufacturing Engineering*. in *CE2000 : 7th ISPE International Conference on Concurrent Engineering*, Lyon, France.
- [15] **Bacha R., Yannou B.** (2000), *Structuration des Données Process en vue de la mise en place d'un Système d'Information fédérateur orienté technologie SGDT*. in *IDMME2000 : Third International Conference on Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering*, Montréal.
- [16] **Yannou B., Limayem F.** (2000), *La méthode SPEC : Suivi de Performances en cours de Conception*. in *IDMME2000 : Third International Conference on Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering*, Montréal.
- [17] **Limayem F., Yannou B.** (2000), *A Monte Carlo Approach to Handle Imprecision in Pairwise comparison*. in *IDMME2000 : Third International Conference on Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering*, Montréal.
- [18] **Chedmail P., Damay T., Yannou B.** (1999), *A multi-agent approach in mechanism design*. in *IFTOMM'99: Tenth world congress on the theory of machine and mechanisms*, Oulu, Finland.
- [19] **Barton R.R., Limayem F., Meckesheimer M., Yannou B.** (1999), *Using Metamodels for Modelling Propagation of Design Uncertainties*. in *ICE'99: Fifth International Conference on Concurrent Enterprising*, The Hague, Netherlands, 521-528.
- [20] **Limayem F., Yannou B.** (1998), *Towards a customer-oriented conceptual computer aided design*. in *IDPT'98: Integrated Design and Process Technology*, Berlin, vol.3, 61-67.
- [21] **Chedmail P., Damay T., Yannou B.** (1998), *A cooperative approach for dimensional synthesis of mechanisms*. in *IDPT'98: Integrated Design and Process Technology*, Berlin, vol. 3, 68-73.

¹⁵ Publication reproduite en **annexe 7.6.7**. Voir aussi le sujet de recherche **(15)** en page 94 ou le **chapitre 5.7** en page 121 pour l'orientation future.

¹⁶ Voir la **Fiche de thèse 6** en page 72.

- [22] ¹⁷**Magner-Canet S., Yannou B.** (1998), *IfNot: a Function-based Approach for both Proactive and Reactive Integrations of New Productive Technologies.* in *FLAIRS'98: Special Track on Reasoning about Functions, in The Eleventh Florida Artificial Intelligence Research Symposium*, Sanibel Island, Florida (USA), 344-350.
- [23] **Medjdoub B., Yannou B.** (1998), *A topological enumeration heuristics in a constraint-based space layout planning.* in *AID'98 : Artificial Intelligence in Design*, Lisbonne, Portugal, .
- [24] **Vasiliu A., Yannou B.** (1997), *Dimensional Synthesis of Planar Path Generator Linkages Using Neural Networks.* in *NATO Advanced Study Institute (ASI) on Computational Methods in Mechanics*, june 16-28, Varna, Bulgaria, .
- [25] **Medjdoub B., Yannou B.** (1996), *Towards a new generation of architectural CAD softwares.* in *ITCSED-96: International Conference on Information Technology in Civil and Structural Engineering Design*, Glasgow, Scotland, 14-16 august 1996.
- [26] **Medjdoub B., Yannou B.** (1996), *ARCHiPLAN: a New Tool of Conceptual Design in Architecture.* in *IDMME-96 : First International Conference on Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Design*, Nantes, 15-17 avril 1996, France, 205-214.
- [27] ¹⁸**Yannou B., Vasiliu A.** (1995), *Design Platform for Planar Mechanisms Based on a Qualitative Kinematics.* in *QR'95: Ninth International Workshop on Qualitative Reasoning about Physical Systems*, Amsterdam, 191-200.
- [28] **Yannou B.** (1993), *Qualitative Design with Envisionment.* in *QR'93: Seventh International Workshop on Qualitative Reasoning about Physical Systems*, 16-20 may 1993, Orcas Island, WA/USA, 250-259.
- [29] **Yannou B.** (1993), *A Phenomenological Qualitative Design.* in *IJCAI's Workshop on "Engineering Problems for Qualitative Reasoning"*, 29 august 1993, Chambéry, France, 1-9.

1.3.4 Publications scientifiques autres

Nous dénombrons ici :

- 2 publications dans des revues nationales avec comité de lecture [30, 31],
 - 4 publications dans des revues techniques avec comité de lecture [34, 35, 36, 38],
 - 4 colloques nationaux avec comité de lecture [32, 33, 37, 39],
 - notre thèse [40].
- [30] ¹⁹**Limayem F., Yannou B.** (2001), *Le Tri Croisé de Monté Carlo : une boîte à outils pour l'aide à la décision coopérative.* **Revue de CFAO et Informatique Graphique, accepté et doit paraître prochainement.**

¹⁷ Publication reproduite en **annexe 7.5.3**.

¹⁸ Publication reproduite en **annexe 7.6.4**. Voir aussi le sujet de recherche (6) en page 81.

- [31] **Chevenier C., Yannou B.** (2001), *Maîtrise des performances et des risques de projet - Enseignements d'application de SPEC à des cas industriels*. **Revue Française de Gestion Industrielle**, Numéro spécial sur le Management par la Valeur, vol. 2/2001, avril 2001.
- [32] ²⁰**Yannou B., Hajsalem S.** (2001), *Comparaison des apports de l'Analyse de la Valeur et de la méthode SPEC sur un cas industriel*. in *PRIMECA'2001 : Septième Colloque sur la Conception Mécanique Intégrée*, La Plagne, France, 422-432.
- [33] **Limayem F., Yannou B.** (2000), *La méthode SPEC : une modélisation détaillée du Cahier des Charges Fonctionnel pour un suivi de projet et une maîtrise des risques*. in *Congrès international AFAV 2000 : Les hommes et le management par la valeur*, Paris, 88-97.
- [34] **Yannou B.** (1999), *Proposition de deux nouveaux outils d'aide à la décision en analyse de la valeur, basés sur une définition opérationnelle de la valeur*. **La Valeur**, 81: p. 7-14.
- [35] **Yannou B.** (1999), *Choix des solutions basé sur la valeur des fonctions : application au projet ELECTRE*. **La Valeur**, 82: p. 17-23.
- [36] **Limayem F., Yannou B.** (1997), *Comment quantifier le besoin ?* **La Valeur**, 74: p. 18-22.
- [37] **Vasiliu A., Yannou B.** (1997), *Synthèse dimensionnelle de mécanismes générateurs de trajectoire par réseaux de neurones*. in *PRIMECA'97 : Cinquième Colloque sur la Conception Mécanique Intégrée*, La Plagne, 315-323.
- [38] **Yannou B., Limayem F.** (1997), *Comment apprécier la satisfaction du besoin ?* **La Valeur**, 73: p. 16-21.
- [39] **Yannou B., Vasiliu A., Mekhilef M.** (1995), *Plate-forme de conception de mécanismes plans basée sur une cinématique qualitative*. in *PRIMECA'95 : Quatrième Colloque sur la Conception Mécanique Intégrée*, 3-5 avril 1995, La Plagne, France, 175-183.
- [40] ²¹**Yannou B.** (1994), *Aide à la Conception Qualitative de Systèmes Dynamiques*. Thèse de l'Ecole Normale Supérieure de Cachan.

1.3.5 Vulgarisation scientifique

- [41] **Mekhilef M., Yannou B.** (1998), *Conception Intégrée Assistée par Ordinateur*. **Techniques de l'Ingénieur**, Doc BM 5006.

¹⁹ Publication reproduite en **annexe 7.6.6**. Voir aussi le sujet de recherche **(17)** en page 98 ou la **Fiche de thèse 5** en page 71.

²⁰ Publication reproduite en **annexe 7.6.5**. Voir aussi les sujets de recherche **(4)** en page 79 et **(14)** en page 92 ou la **Fiche de thèse 5** en page 71.

²¹ Voir la **Fiche de thèse 1** en page 67.

1.4 Encadrement scientifique

1.4.1 Encadrement des thèses

Nous avons soutenu notre thèse au tout début de l'année 1994, ayant été encadré par Jean-Claude BOCQUET. Nous avons tout de suite encadré la thèse de Benachir MEDJDOUB, puis celles d'Adrian VASILIU et de Nathalie PAILLES. Ces trois thèses ont été soutenues, dont deux avec mention très honorable avec félicitations. Deux autres thèses, celles de Frej LIMAYEM et de Rebiha BACHA, sont en fin de rédaction et devraient être toutes les deux soutenues en septembre 2001. Enfin, la thèse de Sinene HAJSALEM a débuté en septembre 2000 dans la continuation de celle de Frej LIMAYEM. On peut ainsi considérer que nous avons actuellement encadré 5 thèses (voir **Figure 2**). Le co-encadrement était assuré par Jean-Claude BOCQUET avec des taux de, respectivement 15% puis 10% (voir **Tableau 1**).

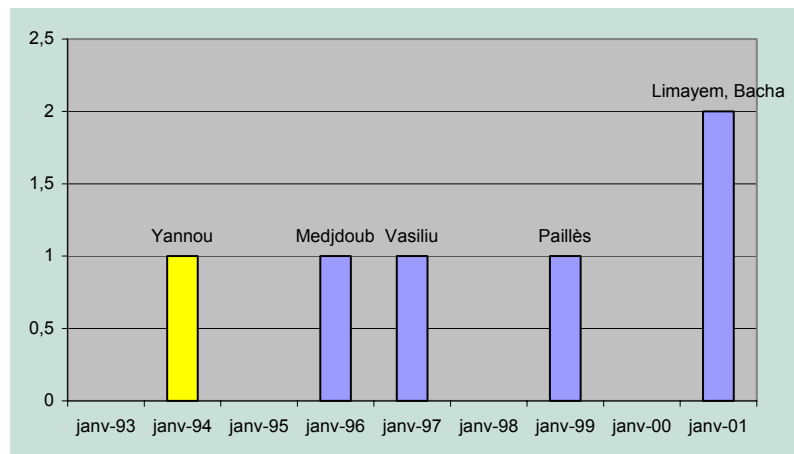


Figure 2 : L'encadrement des thèses

Nous avons bénéficié, au cours de ces 10 années (correspondant au début de notre thèse), d'une grande liberté d'orientation de nos recherches, chose dont nous sommes reconnaissants à Jean-Claude BOCQUET qui nous a toujours soutenu dans nos orientations.

A l'issue des 3 thèses encadrées qui ont été soutenues, les docteurs ont immédiatement trouvé un emploi dans la recherche ou la R&D industrielle. Ils ont été sélectionnés pour les compétences qu'ils ont acquises durant leur recherche doctorale, comme le montre le **Tableau 1**.

	Taux encadr	Titre de la thèse	Situation actuelle	Soutenance
Bernard YANNOU		Aide à la conception qualitative de systèmes dynamiques	Chercheur sur méthodologies de préconception	11 janvier 1994, Très honorable avec félicitations
Benachir MEDJDOUB	85%	Méthode de conception fonctionnelle en architecture : une approche CAO basée sur les contraintes : ARCHiPLAN	Ingénieur de recherche, Martin Research Center, Cambridge, UK. Chargé de développer un logiciel	7 mai 1996 Très honorable

			d'architecture basé sur la programmation par contraintes	
Adrian VASILIU	85%	Une approche CAO pour la préconception des mécanismes plans générateurs de trajectoire : REALISME	Chef de projet développement, société ILOG. Chargé de développer l'algorithme de dépliage de graphe TGU développé en DEA	1 ^{er} février 1997 Très honorable avec félicitations
Nathalie PAILLES	85%	Aproche globale d'aide à la décision d'investissement dans une stratégie de flexibilité pour les projets industriels : Application à l'automobile (ODISAI)	Développement de méthodologies de contrôle de gestion sur les projets recherche, à la Direction de la Recherche de PSA	23 mars 1999 Très honorable avec félicitations
Frej LIMAYEM	90%	Modélisation et gestion des spécifications fonctionnelles en phase de préconception de produit		Prévue en juin 2001
Rebiha BACHA	90%	Gestion et intégration des données techniques en ingénierie de production	Embauche décidée chez Renault S.A. à l'issue de son contrat de thèse	Prévue en septembre 2001
Sinene HAJSALEM	100%	Extension de l'approche SPEC à une prise en compte détaillée des coûts, des valeurs et des risques		Prévue en juin 2003

Tableau 1 : Libellé et caractéristiques administratives des thèses encadrées et de notre thèse

1.4.2 Encadrement des DEA

Nous avons encadré huit stages de DEA (voir **Tableau 2**) qui entrent tous dans nos axes de recherche pour la raison que nous en avons spécifié les sujets.

	Etudiant	Taux encadr	Sujet du mémoire de DEA
1993	Adrian VASILIU	90%	Un algorithme de dépliage des graphes : le TGU (<i>Topological Graph Unfolding</i>)
1994	Salah DHOUB	90%	Un esquisseur CAO 2D basé sur la programmation par contraintes
1996	Frej LIMAYEM	90%	Prise en compte de données incertaines et imprécises dans l'établissement d'un cahier des charges fonctionnel
1997	Laurent GANNE	90%	Spécifications fonctionnelles d'un outil d'aide à la conception coopérative
2000	Ahmed LEMLIOUI	100%	Méthode de choix d'un maître d'œuvre à partir d'un cahier des charges. Cas de la rénovation d'une turbine à combustion.
	Sinene HAJSALEM	100%	Méthode de choix optimal d'un concept de solution au regard du cahier des charges. Cas du produit thermoplongeur.
2001	Hamdi ABDELBASSET	100%	Modèles conceptuels d'évaluation de performances acoustiques
	Vincent ARQUIER	100%	Développement d'une méthodologie de choix de nouveaux matériaux de remplacement dans l'ameublement par une mise en œuvre de la méthode SPEC.

Tableau 2 : *Libellé des DEA encadrés*

2. Préconception de produits

2.1 Introduction à la conception préliminaire

En partant du fait qu'une grande part des coûts irrémédiablement engagés par une entreprise manufacturière, durant le cycle de vie d'un produit, le sont durant la phase de conception (voir [Bellut 1990]), on conçoit l'importance de la qualité et de la maîtrise de celle-ci en termes de performances, de coûts et de délais.

La nature, la richesse, la certitude, la cohérence et la précision des informations qui sont disponibles ou générées au cours du processus de conception d'un produit sont très variables, et pour le moins fortement évolutifs au cours de ce processus (voir [Midler 1998]). Ces informations ainsi que l'historique, les ressources et les stratégies d'une entreprise sont d'une telle complexité que l'informatique se doit d'apporter des outils de management de la conception (voir [Bocquet *et al* 1997a]). Simon [Simon 1977] a montré que l'acte de conception était modélisable et en partie automatisable et qu'en soulageant les concepteurs d'une partie automatisable de la complexité, de nouvelles méthodologies informatisées d'aide à la conception devaient leur permettre de se consacrer à des tâches de créativité et d'innovation.

Notre thème de recherche se place dans le cadre de la conception informatisée des produits et de leurs services associés et, tout particulièrement, dans les premières phases de conception alors qu'on chemine d'un besoin plus ou moins bien formalisé vers des alternatives de structure grossièrement définies dans leur principe : les *concepts de solution*²².

Par la suite, nous assimilerons l'expression du besoin à la notion de *Cahier des Charges* ou encore *Cahier des Charges Fonctionnel*, en admettant comme la pratique (voir [Bernard-Bouissières 2000]) et la littérature semblent le montrer qu'avec une définition large de la notion de *fonction*, un besoin à un instant donné peut s'exprimer comme un ensemble de fonctions.

La question de la notion de *concept* de conception est de celles qui fait couler de l'encre. Elle est naturellement liée à la vision épistémologique de l'acte de conception : quel est le sens de l'activité de conception, quels sont les objets qu'elle manipule, quels sont ses finalités, à quoi aboutit-elle ? (voir [Orel *et al* 1995; Simon 1991] ainsi que [Deshayes 1996] et même [Le Moigne 1990] pour une vision plus systémique et [Findeli 1998] pour un lien avec les méthodologies de conception). Jeantet [Jeantet 1998] décrit les *objets intermédiaires* que génère l'activité de conception, la notion de *concept* dont nous parlons étant également un objet intermédiaire dans la représentation de ce que sera le produit solution final. Des travaux comme ceux de Deshayes [Deshayes 1996], Gero [Suwa *et al* 1998] ou Garro [Garro *et al* 2001] décrivent l'évolution de ces *concepts* et autres *objets intermédiaires* au travers des processus cognitifs qui les transforment. Ces concepts ne se transforment pas de manière linéaire et déterministe ; bien au contraire ils disparaissent, donnent naissance à d'autres concept ou s'enrichissent lorsque la voie de conception s'avère prometteuse pour les concepteurs. Une vision largement partagée est que cet enrichissement est

²² On trouve aussi : *solution de principe, principe de solution, architecture* ou encore *topologie*.

réalisé par des choix imbriqués de *principes de conception* menant ainsi à une vision hiérarchique des concepts de solution (voir par exemple [Pahl et al 1984; Suh 1993]). A mesure que le choix des principes s'effectue, le produit est rapidement modélisable par un nombre croissant de variables. Ces variables sont astreintes à vérifier des contraintes d'ingénierie (traduisant la faisabilité, le possible) et à respecter le cahier des charges (traduisant le besoin, le voulu). Elles se trouvent alors doublement limitées dans leur variabilité. La conception est bien le lieu de rencontre entre ce qui est désiré et ce qui est possible. Ainsi, nous adopterons une définition relativement générale d'un *concept de solution* :

Un concept de solution est une représentation intermédiaire du produit, à un stade où tous les principes de conception n'ont pas été choisis et où les variables le définissant ne sont pas toutes instanciées.

Enfin, il est utile de rappeler une typologie de la conception relativement partagée (voir par exemple [Chandrasekaran 1990]) : on peut avoir affaire à une conception routinière (*routine design*), innovante/innovatrice (*innovative design*) ou créative (*creative design*). Pour la conception routinière, le cahier des charges ne varie que d'une manière quantitative (les fonctions restent les mêmes), les principes et le processus de conception ne changent pas. La conception innovante/innovatrice remet en cause certains principes de conception ainsi que le processus de conception. Quand à la conception créative, elle correspond à un produit nouveau et l'innovation porte déjà sur la définition des fonctions du cahier des charges.

Notre thème de recherche englobe indifféremment ces trois types de conception.

2.2 Définition fonctionnelle de nos axes de recherche

A l'heure actuelle les modèles et raisonnements informatisés en préconception sont peu développés. Les blocages culturels y sont pour beaucoup : on ne voit pas en quoi des modèles informatiques apporteraient quoi que ce soit en préconception qui reste le domaine des « *soft methodologies* », de la créativité et du design, voire on a une peur atavique qu'un jour les puces de silicium ne prennent le dessus sur le cerveau humain²³.

Dans une société où les sciences analytiques ont été poussées à leur paroxysme et où le cloisonnement entre sciences « dures » et « sciences molles » est une réalité, les sciences de la conception et particulièrement de la préconception²⁴ sont encore à construire comme le souligne Simon dans son ouvrage de référence [Simon 1991] publié pour la première fois en 1969.

Ce constat de pauvreté de modèles informatisés est d'autant plus étonnant qu'il est en rupture avec la place grandissante qui est faite à la recherche de concepts et d'innovations produits dans les entreprises manufacturières. Les projets d'innovation

²³ Le succès récent, et assez unique, du corpus méthodologique TRIZ qui est une méthode d'innovation produit systématisée est une exception qui va dans le sens de notre propos.

²⁴ En anglais, *design* pourrait suffire, alors que ce terme englobe en français le *stylisme* (*design* à la française), la *préconception* et la *conception de détail*. Cette *conception de détail*, c'est-à-dire le calcul, la simulation et le dimensionnement, est souvent assimilée en France à la *conception* tout court. Un peu compliqué...

sont officialisés et budgétisés, les services de design prennent de l'importance, la phase d'avant-projet se rallonge la plupart du temps au sein d'un processus de conception qui tend à raccourcir, les indices ne manquent pas. Cette tendance irrémédiable peut trouver une justification rapide dans le fait que les pays industrialisés, ayant affronté les pays en voie de développement (à coût de main d'œuvre réduit) sur le plan de la production dans les deux dernières décennies, se trouvent depuis peu en concurrence sur le plan de la conception de détail. La valeur ajoutée spécifique des pays industrialisés se trouve donc dans des domaines comme ceux de l'innovation, de la préconception, de l'organisation, du management, du conseil, etc...

Or, selon nous, des **modèles et raisonnements informatisés en préconception** doivent permettre de **mieux concevoir, plus vite**, et permettre aux différents acteurs de la conception de **concevoir ensemble**.

Mieux concevoir, c'est :

- **mieux définir** le besoin²⁵, c'est-à-dire :
 - **Représenter** ce qui l'a motivé et la façon dont il a été exprimé (par qui, pourquoi, quand, dans quel contexte, combien) et le **capitaliser** pour le remettre en cause dès que nécessaire²⁶, ce qui est favorable à l'innovation.
 - **Mieux représenter** les incertitudes²⁷ concernant le besoin ou l'estimation des coûts, des délais et des performances et **faire évoluer** ces représentations au cours du projet.
- **mieux représenter** le lien entre ce besoin et les solutions techniques envisagées²⁸ de manière à :
 - **Optimiser** les moyens à mettre en œuvre (coûts globaux, délais de mise sur le marché) pour satisfaire le besoin (performances)²⁹.
 - **Mieux maîtriser** les risques sous-jacents à un choix de conception.
 - **Tester un plus grand nombre** de concepts de solution : dans l'absolu par rapport au besoin, ou relativement entre eux, ou bien encore relativement à ceux de la concurrence³⁰.
 - **Mieux utiliser** les conceptions antérieures de l'entreprise pour éviter d'inventer ce qui l'a déjà été ou de réinventer les processus/mécanismes qui mènent à de bons ou même à de mauvais concepts. Cette capitalisation des stimuli (problèmes ou cahiers des charges) et des réponses (concepts solutions ou mécanismes y menant) est une tâche ardue car elle nécessite aussi de capitaliser le contexte nécessaire à une

²⁵ L'Analyse Fonctionnelle du Besoin, le Cahier des Charges Fonctionnel sont pratiqués par les industriels. L'Ingénierie du Besoin qui généralise ces approches est un domaine émergent chez les industriels comme en recherche (*Requirements Engineering*).

²⁶ Ce qui n'est presque jamais fait dans la pratique industrielle.

²⁷ Dans [O.F.T.A. 1994], Dubois et Prade distinguent deux types d'incertitude : l'imprécision qui exprime l'indécidabilité quand au choix entre plusieurs valeurs et l'incohérence caractérisant des informations ou des connaissances contradictoires.

²⁸ Par des modèles fonctions-structures par exemple.

²⁹ Dans une démarche *Analyse de la Valeur*, par exemple, ou plus généralement dans une démarche de compromis entre valeurs, coûts et risques.

³⁰ Notion de benchmarking technologique ou de produits.

réutilisation. Ce triplet stimulus/réponse/contexte est appelé communément un *cas de conception*³¹.

- **Mieux reconcevoir** en aidant le concepteur à identifier les raisons et les lieux de reconception (parties structurelles ou performances du concept à revoir).

Or, à l'heure actuelle, les besoins relatifs à un produit, à ses services associés et à son projet de conception-industrialisation ne sont pas encore modélisés de manière bien pertinente, en tenant compte des aspects : incertitudes, contextuels, multi-acteurs, et génétique (évolution tout au long du projet). Peu d'outils/méthodes s'orientent donc vers la synthèse automatique ou semi-automatique de concepts, synthèse qui s'appuie sur au moins deux prérequis : la modélisation d'un cahier des charges et une capitalisation du savoir-faire ou tout au moins des conceptions antérieures. De plus, sans cette modélisation du besoin, peu d'outils sont à même de proposer des indicateurs pertinents de pilotage de la conception. Ce constat aboutit au premier axe de recherche :

Axe A : Représentation et raisonnements fonctionnels

Pour concevoir plus vite, il faut notamment éviter de travailler inutilement... Pour ce faire, il faut être pertinent le plus tôt possible dans le processus de conception, et donc :

- **Propager, le plus tôt possible**, les conséquences d'une décision de conception dans le modèle du produit. Cela permet de détecter, dès que possible, les impossibilités de conception, d'identifier les décisions trop contraignantes et de repartir sur l'étude de nouveaux concepts de solution³².
- **Développer des méthodes de synthèse** de concepts de solution à partir du Cahier des Charges Fonctionnel, par raisonnement explicite ou par utilisation d'une base de conceptions antérieures (dite *base de cas*).
- **Développer des méthodes d'analyse** de concepts de solution. Pour ce faire, il ne faut plus se contenter d'opérer sur des modèles totalement dimensionnés (variable valuées) mais être capable d'**opérer sur des modèles incomplets** comme le sont les concepts en préconception (voir notre définition). De telles méthodes permettraient de caractériser de manière générique les performances de classes de solutions et de comparer ces *champs de performances* aux spécifications du CdCF pour valider ou invalider des classes entières de solutions³³.
- **Optimiser les concepts**, si tant est que cela puisse se faire, ou tout au moins indiquer les zones d'*instanciation* (dimensionnement) privilégiées laissant

³¹ La *conception basée sur les cas* (*case-based design*, CBD) ou encore le *raisonnement basé sur les cas* (*case-based reasoning*, CBR) qui correspond à la technique d'Intelligence Artificielle, répond à cette problématique. Néanmoins, d'autres techniques répondent à ce besoin de capitalisation comme les *réseaux de neurones*, la *logique floue*, le *neuro-flou*, l'identification de règles...

³² Les techniques de *Programmation Par Contraintes* nous semblent tout à fait répondre à ce cahier des charges, voir à ce propos l'**annexe 7.5.4**.

³³ Les techniques de *Physique Qualitative*, entre autres, nous semblent tout à fait répondre à ce cahier des charges, voir à ce propos l'**annexe 7.5.2**.

présager de bonnes performances, de manière à ce que la conception de détail se fasse moins « à l'aveuglette »³⁴.

Or, à l'heure actuelle, les outils d'analyse ou de simulation sont presque exclusivement basés sur des modèles déterministes prenant en entrée des solutions complètement évaluées. Or, le principe d'ingénierie simultanée exige de pouvoir cerner au mieux et au plus tôt les conséquences d'une prise de décision concernant le concept de produit sur les performances de celui-ci. **Il faut donc pouvoir évaluer les performances potentielles ou les « champs de performances » des concepts, plutôt que de se restreindre à évaluer les performances particulières d'une solution souvent arbitrairement évaluée.** Il est donc nécessaire de développer des simulateurs ou « évaluateurs de performances » prenant en compte des modèles incomplètement définis. Ce constat aboutit au deuxième axe de recherche :

Axe B : Raisonnements sur des modèles incomplets

Concevoir ensemble, c'est entre autres :

- **Paralléliser** au mieux les tâches en gérant les **conflits** dans un esprit d'**ingénierie simultanée**.
- Permettre de prendre des **décisions de conception plus collégiales et plus réparties (géographiquement et dans le temps)**.

Or, à l'heure actuelle, peu d'outils de conception collaborative, utilisant tous les moyens de conception et de décision répartis et asynchrones que les réseaux informatiques permettraient, existent réellement lors de la phase de préconception de produits. Ce constat en aboutit au troisième axe de recherche :

Axe C : Conception collaborative en préconception

2.3 Contexte international de la recherche

2.3.1 Une classification pour la préconception de produits

Notre thème de recherche de la préconception (*conceptual design*) se retrouve dans 4 domaines de recherche, représentatifs de démarches scientifiques et de communautés de travaux qui s'ignorent parfois :

- 1) Le domaine de l'intelligence artificielle appliquée à la conception,
- 2) Le domaine de la conception intégrée et simultanée en ingénierie mécanique,
- 3) Le domaine des « design theories and methodologies »³⁵,

³⁴ Voir à ce propos le chapitre 5.7 en page 121.

³⁵ La traduction anglaise est volontairement ajoutée pour dissiper des ambiguïtés fortes. D'une part *conceptual design* n'a pas son équivalent en français ; *conception préliminaire* n'est pas correct, *conception conceptuelle* serait bien meilleur mais n'est guère usité. D'autre part, *design methodologies* référence une logique produit théorisée alors que *méthodologies de conception* se rapportent plus en français aux méthodologies industrielles de type Analyse Fonctionnelle,

4) Le domaine des méthodologies industrielles de conception.

Si cette classification, qui nous est personnelle, est pratique pour effectuer un état de l'art de la recherche dans les chapitres qui suivent, elle ne l'est pas pour avoir une vision des revues et colloques dans lesquels sont publiés ou exposés des travaux portant sur la préconception de produits. Nous adoptons donc dans le **Tableau 3** pour les revues et dans le **Tableau 4** pour les colloques une classification sensiblement différente. Les domaines de « Mécanique » et de « Génie Industriel » apparaissent donc, ainsi que celui de « Recherche Opérationnelle » dans lequel de nombreux chercheurs en *conceptual design* publient, notamment ceux travaillant sur les raisonnements avec des données incertaines.

Nous en profitons pour situer qualitativement nos publications effectuées ainsi que celles en projet par rapport à ces domaines.

Domaine	Revue	Publié	En projet
<i>Design Theories and Methodologies</i>	Design Issues		
	Design Studies		X
	Requirements Engineering		X
	Revue de CFAO et Informatique Graphique	X	
Mécanique	Journal of Mechanical Design		X
	Journal of Design and Manufacturing Information		
	Mechanism and Machine Theory	X	
Génie Industriel	RFGI: Revue Française de Gestion Industrielle	X	
	Journal of Engineering Valuation and Cost Analysis		
	International Journal of Value-Based Management		X
Recherche Opérationnelle	Computers and Mathematics with Applications		X
	European Journal of Operational Research		X
Intelligence Artificielle	CAD: Computer Aided Design	X	
	Artificial Intelligence in Engineering	X	
	Fuzzy Sets and Systems		X
	AI-COM: Artificial Intelligence Communications	X	

Tableau 3 : Quelques revues d'intérêt dans nos domaines de recherche

Domaine	Colloques	Publié	En projet
Design Theories and Methodologies	ASME / DTM: Design Theories and Methodologies)	X	
	ASME / DAC: Design Automation Conference)		
	ASME / DETC: Design Engineering Technical Conference		
	EDA: International Conference on Engineering Design and Automation		
Mécanique	IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics		X
	MICAD		X
Mécanique	IFTOMM / word congress on the theory of machine and mechanisms	X	
	NATO Advanced Study Institute (ASI) on Computational Methods in Mechanics	X	
Génie Industriel	IDPT: Integrated Design and Process Technology	X	
	ICED: International Conference on Engineering Design		X
	IDMME: International Conference on Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering	X	
	CE: International Conference on Concurrent Engineering	X	
	ICE: International Conference on Concurrent Enterprising	X	
	MIM: IFAC Symposium on Manufacturing, Modeling, Management and Supervision	X	
	PRIMECA: Pôle de Ressources Informatiques pour la MECAnique	X	
	AFAV	X	
	Intelligence Artificielle	IJCAI: International Joint Conference on Artificial Intelligence	X
AID: Artificial Intelligence in Design	X		
FLAIRS: Special Track on Reasoning about Functions, in The Eleventh Florida Artificial Intelligence Research Symposium	X		

Tableau 4 : Quelques colloques d'intérêt dans nos domaines de recherche

2.3.2 Le domaine de l'intelligence artificielle appliquée à la conception

2.3.2.1 Présentation

Une des missions de l'Intelligence Artificielle (IA) étant de simuler des processus du raisonnement humain, il est tout à fait normal que les chercheurs de ce domaine se soient intéressés à la *modélisation des objectifs et aux raisonnements issus de ces objectifs*. Depuis une quinzaine d'années, on voit une forte recrudescence d'intérêt de cette communauté d'« IA » pour ces problèmes. Nous distinguerons trois domaines d'application qui nous intéressent ici :

- la *science de la conception* où l'architecture puis la conception mécanique sont prépondérants,
- le *diagnostic* (de pannes la plupart du temps),
- la *modélisation fonctionnelle et les raisonnements génériques* (indépendamment de tout domaine)

Tout colloque international d'IA est généralement structuré en sessions consacrées à des problématiques de recherche relativement diverses (disons une trentaine). Depuis 15 ans, on a vu apparaître les problématiques suivantes :

- **Modélisation et raisonnement fonctionnels** (*Functional Modelling and Reasoning* ou encore *Reasoning about Function*),
- Raisonnement basé sur les modèles (*Model-Based Reasoning, MBR*),
- **Physique qualitative** (*Qualitative Physics, QP*) ou plus communément maintenant Raisonnement qualitatif (*Qualitative Reasoning, QR*),
- **Raisonnement basé sur les cas** (*Case-Based Reasoning, CBR*) ou lorsque c'est appliqué à la conception **Conception basée sur les cas** (*Case-Based Design, CBD*),
- Simulation pilotée par les buts (*Goal-Based Simulation*),
- Plus généralement, ces problématiques se regroupent sous le terme de *Artificial Intelligence in Design (AI in design, AID)*.

A cette première liste s'ajoute une seconde liste peut être plus connue :

- Logique floue (*fuzzy Logic, FL*)
- Réseaux de neurones (*Neural Networks, NN*),
- Algorithmes génétiques (*Genetic Algorithms*),
- **Programmation par Contraintes** (*Constraints Programming*) et Problèmes à satisfaction de contraintes (*Constraint Satisfaction Problems, CSP*),
- Et toutes les méthodes heuristiques en Recherche Opérationnelle comme le Recuit Simulé (*Simulated Annealing*), la Recherche tabou (*Tabu Search*), les Systèmes de colonies de fourmis (*Ant Colony Systems*)...

Nous détaillons par la suite les 4 problématiques en gras dans le texte au niveau de leur adéquation avec le *conceptual design*.

Parmi celles-ci, les 3 premières ont trait à des modèles fonctionnels et aux raisonnements issus de ces modèles d'objectifs pour :

- Synthétiser automatiquement ou semi-automatiquement des solutions de conception,
- Générer des algorithmes de diagnostic de panne ou de supervision intelligents,
- Générer des cadres de simulation ou même les simulateurs eux-mêmes pour répondre à des questions précises portant sur les performances d'une solution³⁶. Il s'agit de la problématique de la *simulation pilotée par les buts* (*Goal-Based Simulation*)

Ces raisonnements sont mis en jeu à partir :

- A) de connaissances explicites d'experts produisant des modèles d'inférence indépendants du problème, donc génériques
- B) de connaissances explicites d'experts produisant des modèles dépendant du problème,
- C) d'une capitalisation des résolutions de problèmes antérieurs pour, à partir d'un nouveau cahier des charges, produire des solutions ayant des chances d'être satisfaites (c'est le cas notamment du *case-based design* / *case-based reasoning*, des réseaux de neurones, de la logique floue, des algorithmes génétiques).

Les chercheurs fréquentant ces colloques d'IA sont à peu près :

- à 40% des chercheurs en informatique/IA,
- à 30% des chercheurs architectes,
- à 20% des chercheurs en mécanique ou génie industriel,
- à 10% divers.

L'intérêt de fréquenter ce domaine est, bien entendu, de connaître les modèles et raisonnements génériques (sur le fonctionnel, sur les modèles causaux de la physique, sur la synthèse de solutions, sur la simulation...) et de pouvoir transférer une approche d'un domaine scientifique à un autre (de l'architecture vers la mécanique, du diagnostic vers la conception...).

2.3.2 Modélisation et raisonnements fonctionnels en IA

De très nombreux travaux portent sur la **Modélisation et les raisonnements fonctionnels en IA** notamment pour aborder la conception. Cette perspective a sûrement été mise en valeur clairement pour la première fois par Simon dans [Simon 1977]. Chandrasekaran établit dans [Chandrasekaran 1994] les relations existant entre *modèles fonctionnels* et *modèles causaux*, c'est-à-dire entre des modèles de fonctions représentant des comportements désirés et des modèles de graphes de causalité représentant la causalité entre variables physiques du comportement réel du système/produit existant. Chittaro [Chittaro 1995] utilise des graphes de causalité bien connus des mécaniciens et des automaticiens : les *graphes de liaisons* ou *bond graphs* pour établir le diagnostic d'un système défaillant observé. Goel [Goel *et al* 1993] utilise une représentation fonctionnelle pour proposer une méthode de reconception de produits. Malmqvist [Malmqvist 1995] utilise le modèle fonctionnel du produit comme support de l'historique de conception. Umeda et Tomiyama [Tomiyama *et al* 1993; Umeda *et al* 1996] proposent le modèle FBS (*Function/Behavior/state*) comme modèle de produit

³⁶ on dit souvent structure

durant le processus de conception d'un système mécanique. Ce modèle propose des fonctionnalités de vérification de cohérence comportementale du concept de produit³⁷ et de reconception. Ceci est rendu possible par une modularité par petites briques fonctions/structures/comportements qui s'assemblent hiérarchiquement. Falkenhainer et Forbus [Falkenhainer *et al* 1991] puis Bose et Rajamoney [Bose *et al* 1992; Bose *et al* 1993] proposent le modèle du *compositionnal modelling* qui est basé sur un principe similaire de modularité pour effectuer une *simulation pilotée par les buts*, en assemblant le strict nécessaire des parties du système physique pour concevoir le simulateur tout en gérant la cohérence des hypothèses de validité de ces différentes parties. Ce système d'assemblage de briques dites de composants-connexions est une méthode privilégiée pour effectuer une **synthèse** de produit/système solution à partir d'un cahier des charges. Cet assemblage de briques fonctionnelles nécessite de vérifier le principe « *no function in structure* » exposé par de Kleer et Brown dans [de Kleer *et al* 1984b]. Nous expliquons dans [9] que ce principe ne peut hélas s'appliquer qu'à certaines classes de problèmes de conception mécanique. Williams par exemple a proposé un système de synthèse, IBIS, vérifiant ce principe [Williams 1990; Williams 1991]. Il se trouve devant l'incontournable problème en synthèse de l'explosion combinatoire des solutions assemblées. Un état de l'art concernant spécifiquement les modèles fonctions-structures-comportements se trouve en **annexe 7.5.3**.

Positionnement

Nous avons contribué à développer avec Canet-Magnet dans [22] reproduit en **annexe 7.5.3**³⁸, un modèle fonctionnel de nouvelles technologies de production basé sur une représentation FBPS (*Function / Behavior / Process / Structure*). D'un côté, les attendus d'une entreprise en termes de fonctions d'intégration d'une nouvelle technologie sont modélisés. De l'autre côté, les possibilités fonctionnelles d'une technologie sont modélisées. Un cadre d'adéquation entre attendus et solutions (on dira **superposition** ou *mapping* dans la suite de ce document) est proposé qui permet une propagation bidirectionnelle même lorsque les données sont incomplètes.

2.3.2.3 Physique et mécanique qualitative

Nous nous sommes orientés durant notre thèse [40] vers une thématique de l'Intelligence Artificielle appliquée aux sciences de l'ingénieur: la **Physique Qualitative** ou *Raisonnement Qualitatif (sur les systèmes physiques)*, qui était en émergence dans les années 1990. Elle s'est avérée apporter des éléments de réponse dans le champs de la préconception de produits. En effet, ce thème de recherche posait la question générique « *Comment effectuer un raisonnement sur les phénomènes et systèmes physiques d'une manière qui, d'une part, ne soit pas basée sur des raisonnements purement numériques et des simulations analytiques classiques et, d'autre part qui ne soit pas basée sur des connaissances heuristiques* ».

³⁷ Rappelons que peu de méthodes sont capables d'estimer les comportements d'un concept de système physique, avant qu'il ne soit complètement conçu ou instancié.

³⁸ A consulter pour avoir une bibliographie complémentaire sur les modèles fonctionnels en IA.

En voulant ne pas faire que du numérique on voulait être capable de raisonner sur des modèles incomplètement définis :

- **soit parce que les données ne sont pas encore disponibles comme c'est le cas dans les premières phases de conception d'un produit**, ou qu'un système automatique ne dispose pas d'assez de capteurs pour effectuer un diagnostic juste,
- **soit parce qu'on désire connaître les propriétés ou les comportement génériques d'une famille de problèmes pour avoir des informations « de plus haut niveau »**. En effet, le « numérique est aveugle » dans le sens où une simulation numérique classique sur un problème physique dont on connaît toutes les caractéristiques (variables instanciées à des valeurs particulières « pressenties » pour être les meilleures) n'apporte qu'une information locale sur les propriétés comportementales du seul système. Or, pour de nombreux problèmes d'ingénierie, on désire savoir si telle alternative de conception, c'est-à-dire tel *concept* (représentant une famille de conceptions détaillées), a des chances de fonctionner, et quelles sont alors les propriétés comportementales génériques (*champs de performances* de type comportemental³⁹) de cette alternative. Il s'agit également là d'un problème fondamental qu'on retrouve en ingénierie simultanée : « *Comment caractériser le plus rapidement les conséquences du choix d'une alternative en conception de produit pour en faire bénéficier le plus tôt possible tous les acteurs de la conception ?* ». Un autre exemple de raisonnement générique est le raisonnement sur les *graphes de causalité* qui modélisent qualitativement des familles de problèmes en médecine, géologie, économie, etc... Prenons également le cas de la supervision de procédés et du diagnostic de pannes où des méthodes de physique qualitative ont été développées pour détecter que le comportement observé d'un système automatique est « qualitativement » incohérent et pour trouver la nature probable du dysfonctionnement par simulations de familles de problèmes et comparaison avec le comportement observé.

Les méthodes développées dans le domaine de la physique qualitative ne sont pas du tout basées sur les heuristiques d'experts du domaine comme c'est le cas dans le domaine des *knowledge based systems* ou autrement dit des systèmes experts. En effet, les modèles de la Physique Qualitative sont basés sur des *modèles profonds* (au sens de l'IA) issus de la physique. On distingue ainsi trois types de raisonnement en Physique Qualitative :

- **Raisonnement sur les systèmes d'équation,**
- **Raisonnement sur les graphes de causalité,**
- **Raisonnement sur les systèmes physiques par connexion de composants physiques** (déjà évoqué auparavant au niveau de la *Modélisation et des raisonnements fonctionnels*)

³⁹ La Physique Qualitative ne s'intéresse pas à des performances provenant de fonctions subjectives comme l'esthétique ou l'ergonomie par exemple, elle ne s'intéresse qu'à des performances comportementales d'un système physique actif agissant physiquement sur son environnement.

Le **Raisonnement sur les systèmes d'équation** s'appuie sur des algèbres qualitatives pour les variables physiques. Missier [Missier 1991] perfectionne des *algèbres de signes* dans le but d'améliorer les techniques de simulation qualitative raisonnant sur les tendances d'évolution des variables physiques et de leurs dérivées successives. Raiman [Raiman 1991] et Davis [Davis 1989] développent deux approches majeures de raisonnement sur les *ordres de grandeur* qui s'avèrent être des raisonnements très intéressants lorsqu'on ne dispose que d'informations qualitatives sur des problèmes physiques dont on connaît la nature (et les équations les régissant). Des raisonnements génériques sur des systèmes d'équations de la physique sont développés. Citons tout d'abord Coiera [Coiera 1989] qui effectue une identification d'équations qualitatives à partir de données observées incomplètes. Puis Bhaskar et Nigam [Bhaskar *et al* 1990] automatisent un raisonnement formel sur *l'analyse dimensionnelle* effectuée sur un système d'équations qualitatives. Par la suite, Hertkorn et Rudolph [Hertkorn *et al* 1998] utilisent la *théorie de la similitude* pour identifier des classes de systèmes physiques ayant les mêmes invariants au travers des *théorèmes de Buckingham* ; ces invariants serviront par la suite comme index d'une base de cas (il s'agit de *conception basée sur les cas, Case-Based Design*) pour effectuer une *synthèse* de système physique. Weld quand à lui [Weld 1992a; Weld 1992b] développe une théorie d'auto-raffinement ou d'auto-approximation d'un modèle d'analyse de la physique, qui garantisse un niveau de précision numérique de la réponse. Enfin, Addanki, Cremonini et Penberthy [Addanki *et al* 1989; Addanki *et al* 1991] développent la théorie des *graphes de modèles* pour passer automatiquement au cours d'une analyse/simulation d'un modèle physique à un autre plus fin ou plus grossier lorsque les hypothèse de modélisation ne sont plus respectées (exemple : passage d'un modèle de résistance des matériaux à celui d'un modèle par éléments finis).

Trois approches majeures de *simulation qualitative* continue de systèmes physique, basées sur des systèmes d'équations qualitatives, ont été développées : l'approche QSIM de Kuipers et son équipe (voir [Clancy *et al* 1993; Cui *et al* 1992; Dalle Molle 1989; Fouché 1992; Kuipers 1986; Kuipers 1987; Kuipers *et al* 1991]), l'approche QPT de Forbus [Forbus 1984; Forbus 1986] et l'approche de de Kleer [de Kleer *et al* 1984a; de Kleer *et al* 1984b].

Le **Raisonnement sur les graphes de causalité** a mené à des méthodes de simulation, essentiellement à des fins de supervision et de diagnostic de pannes. Régis Vescovi [Regis Vescovi 1991] a travaillé sur le problème de l'ordonnancement causal (*causal ordering*) lorsque le graphe de causalité n'étant pas disponible, il faut le générer à partir d'un système d'équations brut. Dziopa utilise un graphe de causalité pour établir un système de *supervision de procédés* [Dziopa *et al* 1993]. Charbonnaud [Charbonnaud 1991] et Lucas [Lucas 1994] établissent des méthodes de *diagnostic de pannes* à partir de graphes de causalité. Bousson [Bousson *et al* 1993] utilise la logique floue pour modéliser l'imprécision sur les arcs de causalité aboutissant ainsi à une *simulation floue* avec des comportements divergents dans le temps. Le modèle des *graphes de liaison* (*bond graphs*) est un modèle riche de graphes de causalité, très utilisé en mécanique et en automatique. Baretto [Barreto 1989], Cellier [Cellier 1991] et Lucas [Lucas 1994] l'utilisent pour divers raisonnements qualitatifs. Top a bien étudié l'utilisation des *graphes de liaison* dans une perspective de *conceptual design* [Top 1993].

Un des domaines qui nous a le plus intéressés est celui de l'**Application de la physique qualitative à la mécanique ou Mécanique Qualitative**. A partir de 1987,

deux approches majeures de **simulation qualitative et conception de concepts de mécanismes** vont se développer. Ces deux approches sont très sophistiquées et sont à notre sens celles qui sont le plus à même d'effectuer du *conceptual design* sur certaines classes de mécanismes dans une optique de conception créative. En effet, ces deux approches vont permettre de caractériser les champs de comportements de concepts de mécanismes (voir le point 3 de la **Figure 1**) et de vérifier l'adéquation avec les comportements désirés (voir le point 4 de la **Figure 1**). Ces deux approches se limitent à des classes de mécanismes dits à *axes fixes* (les pièces sont en translation ou en rotation par rapport à un axe fixe), mécanismes tridimensionnels à *topologie variable* (les liaisons entre pièces peuvent être temporaires : contacts). Pour Joskowicz et Sacks [Joskowicz *et al* 1993], la part de ces mécanismes est estimée à 50% des 2500 mécanismes de l'encyclopédie Artobolevsky [Artobolevski 1975]. Ces deux approches sont celles de :

- **Joskowicz** (alternativement avec Addanki, Sacks, Neville) [Joskowicz 1987; Joskowicz 1989a; Joskowicz 1989b; Joskowicz *et al* 1988; Joskowicz *et al* 1993; Joskowicz *et al* 1991; Neville *et al* 1992; Sacks 1992],
- **Faltings** (avec Forbus et Nielsen au début puis avec Sun) [Faltings 1987; Faltings 1992; Faltings *et al* 1993; Forbus *et al* 1978; Forbus *et al* 1991; Sun 1994].

Ces deux approches de **cinématique qualitative de mécanismes** sont assez similaires dans leur principe de base. Elles sont basées sur une représentation de la cinématique admissible du concept, sous la forme d'un partitionnement de l'espace de phase des variables cinématiques. Cette partie admissible de l'espace de phase qu'on appelle *espace de configuration* est codée par des informations quantitatives et symboliques. Le principe de base est que deux objets ne peuvent être à la même place au même moment et l'espace de configuration peut être considéré comme l'espace où les pièces ne se chevauchent pas. Une simulation cinématique donne lieu à une description de tous les comportements cinématiques possibles⁴⁰ sous une forme symbolique/formelle (car le concept de mécanisme est paramétré sans dimension particulière). Il s'agit déjà là d'un facteur majeur de compréhension pour le concepteur. Joskowicz teste son modèle sur des mécanismes tridimensionnels comme un chargeur automatique. Faltings, par contre, se limite au départ à des cames complexes comme une roue à cliquet et l'étend à des systèmes d'horlogerie.

Des extensions furent apportées à ces modèles de base pour permettre d'effectuer de la **conception créative de concept**. Neville et Joskowicz [Neville *et al* 1992] s'intéressent au processus de validation d'une alternative de conception vis-à-vis d'un comportement désiré. Ils établissent un langage très simple de description d'un comportement désiré (*actual motion*), basé sur des prédicats et des relations algébriques. Ce langage définit les mouvements des pièces (simultanés ou pas), leur amplitude (valuée ou pas), et leur enchaînement causal (exemple : « *la rotation du levier de plus de 30° laisse le coulisseau libre de se translater* »). Une simulation dans l'espace des configurations, à partir des mouvements d'entrée, donne en résultat le comportement réel (*true motion*). Une comparaison finale entre le comportement désiré et le

⁴⁰ Des bifurcations comportementales dépendantes de relations formelles entre variables dimensionnelles sont détectées.

comportement réel⁴¹ permet de conclure si le mécanisme étudié est une bonne alternative de conception. Dans l'affirmative, **les contraintes supplémentaires que le mécanisme doit nécessairement vérifier sont établies. La variabilité du concept est en quelque sorte réduite.**

Cette approche a été améliorée dans le travail de Faltings et Sun [Faltings *et al* 1993; Sun 1994]. Un langage d'une grande expressivité a été proposé pour représenter qualitativement des fonctions mécaniques. Ce langage utilise des concepts de *dynamique qualitative* : forces et mouvements qualitatifs, conditions de transmission du mouvement entre deux états qualitatifs. Une notion de *fonction mécanique* est définie par des expressions logiques reliant les forces et mouvements extérieurs avec des prédicats décrivant des mouvements du mécanisme. Des **fonctionnalités de reconception du concept** permettent de partir de formes de pièces et de dimensions données pour évoluer vers un mécanisme compatible avec les fonctions mécaniques. Pour ce faire, le système propose une aide pour identifier les fonctions qui ne sont pas encore vérifiées et pour **analyser les raisons des conflits**. De plus, il suggère au concepteur l'utilisation d'un des deux types d'opérateurs de modification : une modification de dimension pour une variable particulière ou une modification de forme de pièce. Bien que le système fournisse quelques indices pour tendre vers les fonctions mécaniques, la tâche de reconception reste à l'initiative du concepteur, il ne s'agit pas de synthèse.

D'autres travaux moins majeurs ont été menés dans le domaine de la mécanique qualitative. Kim [Kim 1991] ainsi que Shrobe [Shrobe 1993] se sont intéressés à la **simulation qualitative de mécanismes à barres**. Subramanian et Wang [Subramanian *et al* 1993] ont proposé une méthode de **synthèse de mécanisme** à topologie constante et à axes fixes sous la forme d'un assemblage arborescent de mécanismes élémentaires (engrenages, bielle-manivelle, pignon-crémaillère, etc). Chaque mécanisme élémentaire est défini par une fonction de transfert qualitative (rotation ou translation, mouvement constant ou alternatif, et donc valeur de vitesse constante ou fréquence...). La synthèse se fait à partir d'un cahier des charges qualitatif. L'inévitable problème d'explosion combinatoire des solutions, inhérente aux méthodes de synthèse, se pose. Fauroux en France [Fauroux 1999] a proposé récemment dans cette veine une solution tout à fait satisfaisante de synthèse de mécanismes à axes fixes de type réducteur à partir d'un cahier des charges représentatif d'un problème industriel.

Enfin, soulignons également l'**Application du raisonnement qualitatif à l'analyse des structures mécaniques**. Bozzo et Fenves [Bozzo *et al* 1992] entre autres ont proposé de **raisonner qualitativement en résistance des matériaux sur des concepts de treillis de poutres**. Ils utilisent une simple algèbre des signes pour exprimer le sens des forces et des déformations ; cela leur permet d'envisager qualitativement tous les modes qualitatifs de déformation des treillis (quelques soient les dimensions du treillis puisqu'il s'agit d'un concept).

<i>Positionnement</i>

Nos propres travaux en physique qualitative ont donné lieu au développement de 3 méthodes.
--

⁴¹ Utilisation d'une technique de CLP, c'est-à-dire de la Programmation par Contraintes dans un environnement Prolog. La comparaison en question est en fait une *unification* Prolog.

L'une est une méthode générique de conception et a fait l'objet de notre thèse [40] (voir aussi les publications [28, 29], la **Fiche de thèse 1** en page 67 et le sujet de recherche **(5)** en page 80).

La seconde est une méthode de simulation cinématique qualitative de mécanisme plan [27, 39] et est décrite dans le sujet de recherche **(6)** en page 81.

La troisième est une méthode de synthèse de mécanismes plans par raisonnement sur des cas qualitatifs s'appuyant sur le précédent modèle de simulation (voir sujet **(8)** en page 83). Cette dernière méthode a été développée dans le cadre de la thèse de Vasiliu ([Vasiliu 1997], et **Fiche de thèse 3** en page 69).

Notre investissement au sein de la *communauté française de Physique Qualitative* est évoqué au **chapitre 4.1.1** en page 102. Un état de l'art plus détaillé des travaux de *physique qualitative pour la préconception* de produit est fourni en **annexe 7.5.2**.

2.3.2.4 Conception basée sur les cas

Un cas de conception est, en gros, l'association :

- d'un cahier des charges, ou tout au moins d'un ensemble de performances représentatives de la conception,
- de la structure solution de la conception,
- du contexte dans lequel la conception a eu lieu.

On capitalise des cas de conception dans une *base de cas* lorsqu'on a affaire à une conception routinière ou au pire innovatrice, dans l'espoir de pouvoir, face à un nouveau problème défini par un cahier des charges et un contexte, trouver une solution à peu près correcte rapidement. Le nouveau cahier des charges et le contexte définissent un index qui est comparé aux index de la base de cas ; une *métrique d'index* permet de trouver les cas les plus proches. Pour ceux-là des procédures *d'adaptation* permettent d'améliorer la structure synthétisée.

Des aspects théoriques peuvent être trouvés dans Kolodner [Kolodner 1992].

Navichandran, Sycara et Narasimhan proposent dans [Navichandran *et al* 1991] un principe de *Case-Based Design (CBD)* pour concevoir des composants hydro-mécaniques. Duverlié estime les coûts de fabrication de pièces mécaniques très tôt dans le processus de conception. Hertkorn et Rudolph [Hertkorn *et al* 1998] utilisent un raisonnement de physique qualitative pour établir des invariants de systèmes physiques qui seront codés dans l'index du cas.

Le raisonnement basé sur les cas est en fait un *raisonnement analogique* qui n'a des chances de fonctionner que si le nombre de cas dont on dispose est suffisant relativement à la dimension du problème. Il est bien pratique de pouvoir générer des cas en automatique ; cela est possible lorsqu'on dispose d'un simulateur de performances (exemple : estimateur de coûts...). Dans ce cas, cette technique est alors vue comme une technique d'inversion de fonction mathématique plutôt que de capitalisation.

Nous avons développé avec Vasiliu (voir **Fiche de thèse 3** en page 69) une **méthode de synthèse de mécanismes plans générateurs de trajectoire basée sur des cas dit qualitatifs** (voir sujet de recherche (8)). En effet, les cas avaient des performances qualitatives en termes de trajectoires cinématiques qualitatives. Ces cas sont générés automatiquement par une *simulation cinématique qualitative* issue d'un modèle que nous avons proposé (voir [27, 39]).

2.3.2.5 Programmation par contraintes

La *programmation par contraintes* ou PPC représente un ensemble de techniques pour résoudre un problème mathématique sous la forme de *variables* reliées par des *contraintes*. Sa spécificité est qu'elle opère une réduction du domaine initial des variables « dès que possible » et de manière la plus consistante que lui permet la technique utilisée. Cette « réduction du domaine initial des variables dès que possible » la rend, à notre sens, privilégiée pour la préconception de produits. En effet, elle permet d'informer le concepteur au fur et à mesure que les choix de conception déclenchent l'apparition de nouvelles variables et la prise en compte de contraintes d'ingénierie, de la réduction de variabilité du concept et que la viabilité de celui-ci subsiste. **La PPC donne une vision cohérente et riche de l'état des degrés de liberté restants d'un produit à un moment donné de sa conception.**

Cette technique permet de prendre en compte des contraintes de produits mais aussi des contraintes de processus et de mener des *raisonnement hypothétiques* : « *Que se passerait-il si je faisais tel choix de conception, mon concept serait-il toujours viable ? Cela me contraindrait-il beaucoup ma conception ?...* ». En menant ces *raisonnement hypothétiques*, on est par la suite à même de prendre la meilleure décision. Naturellement donc, ces techniques se couplent parfaitement avec des techniques de *Systèmes à base de connaissance* et des *modeleurs CAO*.

Ces techniques de PPC ont également ceci de particulier et d'avantageux (dans leur version *CLP : Constraint Logic Programming*) pour la préconception que :

- elles sont nativement dans un environnement où ces raisonnements hypothétiques sont possibles, (restitution du système contraint lors des retours arrières),
- l'énumération de toutes les solutions et une optimisation de type *branch and bound* sont natives,
- des *stratégies dynamiques d'énumération* peuvent être définies de manière découplée de la pose des contraintes, ce découplage permettant une très grande déclarativité,
- ces stratégies d'énumération permettent de saisir l'intuition des concepteurs sur la faisabilité du concept d'après le cahier des charges, cette intuition accélérant considérablement la recherche d'un optimum (voir Sadeh [Sadeh 1991] pour un exemple d'ordonnancement d'atelier),
- ces techniques sont par conséquent des techniques privilégiées pour faire de la *synthèse* car le cahier des charges peut commencer à être représenté par des contraintes qui sont « propagées » au travers du modèle du concept en cours de construction. Une capitalisation des règles de conception au sein d'un système à

base de connaissances peut permettre de jouer en automatique une énumération de toutes les conceptions au travers d'un arbre de recherche.

Les techniques de PPC ont réellement commencé à être appliquées il y a une dizaine d'années [Davis 1987; Dincbas 1990; Fox *et al* 1990; Hyvönen 1992; Jaffar *et al* 1987; Montanari *et al* 1989] bien que les premiers travaux théoriques aient vu le jour il y a plus de vingt ans [Freuder 1978; Macworth 1977; Montanari 1974; Waltz 1972].

On pourra consulter Fron [Fron 1994] ou Jegou [Jegou 1991] pour une présentation général des techniques.

On pourra consulter Hanser [Hanser 1990] ou Janssen [Janssen 1990] pour être convaincu de l'intérêt de ces techniques en conception. Jung [Jung 1994] ou Shen, Barthes et El Dashan [Shen *et al* 1994] soulignent l'intérêt de ces techniques pour représenter des contraintes mécaniques complexes en CAO ; toutefois réaliser des modeleurs géométriques tridimensionnels n'est pas encore possible. Vargas montre tout de même avec son système DAS que la PPC peut modéliser avantageusement des contraintes produits et des contraintes processus en préconception d'une culasse d'automobile. Fischer [Fischer 2000] couple des techniques de PPC à des modèles neuronaux pour concevoir des appareils à pression. Cette technique a également été largement utilisée pour l'optimisation et la synthèse de solutions d'allocation spatiale [Aggoun *et al* 1992; Charman 1995; Damski *et al* 1996; Du Verdier 1993; Maculet 1991].

Enfin, la PPC est une technique très privilégiée pour aborder la conception collaborative. Le système JADE de Bourne et al [Bourne *et al* 1990] est un système de gestion des contraintes dédié à un seul concepteur. Chaque concepteur a une visualisation graphique des degrés de liberté restants sur les variables dont il a la responsabilité. JADE gère également les processus de conception. Le système DIAMANT de Degirmenciyan, Foussier et Chollet [Degirmenciyan *et al* 1994] étant l'approche JADE à la conception collaborative. Les concepteurs ont des variables en commun dites *variables de liaisons*. Le système DIAMANT informe chaque concepteur de l'influence des autres concepteurs sur ses propres variables par l'intermédiaire des *variables de liaisons* en proposant un protocole de dialogue (acceptation de réduction de domaine ou refus). Une typologie de protocoles de résolution de conflits est proposée. Un autre exemple de supervision de conflits en conception collaborative est donné dans Haroud et al [Haroud Djamila *et al* 1995] pour un problème de conception préliminaire de pont. On peut consulter Lottaz et al [Lottaz *et al* 1998] pour un état de l'art de la PPC pour la conception collaborative.

Positionnement

Nous avons utilisé une technique de PPC pour développer une **approche originale de synthèse de solution d'allocation spatiale**. La PPC nous a permis de définir une notion de *solution topologique de placement* qui est un concept, au sens où c'est un système de variables contraintes ayant encore une variabilité et ayant une représentation graphique parlante pour le concepteur (similaire à la notion d'*esquisse*). Un algorithme original d'énumération de toutes les solutions topologiques a été proposé. Cette approche développée dans le cadre de la thèse de Medjdoub ([Medjdoub 1996] et **Fiche de thèse 2** en page 68) a donné lieu à deux publications internationales

[1, 3] (voir **annexe 7.6.1** en page 154) et à [23, 25, 26]. Voir les sujets de recherche **(1)** en page 76 et **(10)** en page 85.

Nous avons encadré un sujet de DEA intitulé « **Un esquisseur CAO 2D basé sur la programmation par contraintes** » qui a donné de bons résultats (voir **Tableau 7** en page 73).

Une revue plus détaillée de l'intérêt des techniques de PPC pour la préconception est fournie en **annexe 7.5.4**.

2.3.3 Le domaine de la conception intégrée et simultanée en ingénierie mécanique

Le domaine de la conception intégrée et simultanée en ingénierie mécanique se différencie des travaux « purement IA » par le fait que les travaux qui s'y rattachent ont pour vocation de traiter de cas d'étude industriels, et du domaine des « *Design Theories and Methodologies* » par le fait que les travaux qui s'y rattachent prennent souvent en compte des variables hétérogènes de l'entreprise (variables produits mais aussi outils de production, variables processus et flux, variables coûts, variables temporelles, variables humaines...) ⁴².

2.3.3.1 Modèles de produits et de processus

Les **systèmes à base de connaissance couplés à des systèmes CAO** sont devenus depuis plus de 10 ans des systèmes performants pour effectuer de la préconception en se basant sur une capitalisation des connaissances de conception (voir Coyne et al [Coyne et al 1990] et Trousse [Trousse 1993]).

La **modélisation basée sur les caractéristiques** (*Feature based Modelling*) qui permet d'associer des connaissances métier (usinage, métrologie, coût, calcul...) à des parties (caractéristiques) d'un produit est bien adaptée à mener des raisonnements, au fur et à mesure de l'affinement du modèle du produit (voir Cocquebert et al [Cocquebert et al 1992]).

La **conception fonctionnelle** (voir Teixido [Teixido et al 1995] pour les principes), qui s'intéresse à la définition incrémentale du modèle de produit dans une démarche fonctionnelle, est un domaine dans lequel de nombreux travaux ont eu lieu (voir Dupinet [Dupinet 1991], Chambolle [Chambolle 1995], Constant [Constant 1996] et Harani [Harani 1997]). Ben Amara et al évoquent dans [Ben Amara et al 1996] le prédimensionnement dans une démarche de conception fonctionnelle.

Les **approches systèmes** apportent des éléments pour comprendre et pour agir dès les premières phases de définition d'un système complexe. La **systémique** (voir Le Moigne [Le Moigne 1990] pour les fondements) est à la base de l'**Ingénierie du besoin** (voir Cauvet et al [Cauvet et al 2001] pour un état de l'art). Elle permet également de raisonner sur la dynamique des systèmes complexes (voir Saint Paul [Saint Paul 1992]) et d'aborder correctement d'un point de vue fonctionnement la modularisation d'un

⁴² Parfois la frontière entre domaines n'est pas claire et les chapitres concernant la PPC et la conception basée sur les cas auraient pu figurer dans cette partie.

système technique complexe (voir Le Gallou [Le Gallou 1992] et Auger [Auger 1992]). Cette décomposition doit également être optimale pour des aspects sureté de fonctionnement (voir Sridhar [Sridhar *et al* 1996] et Laval [Laval 1999; Laval *et al* 1998]). **L'ingénierie système** définit notamment au travers de la norme américaine [ANSI/EIA-632 1998] des processus d'ingénierie pour déployer des projets de développement de systèmes complexes, et ceci dès les premières phases de la conception.

Positionnement

Nous avons proposé, au cours de la thèse de Paillès ([Paillès 1999], voir **Fiche de thèse 4** en page 69), un **modèle fonctionnel des objectifs d'un projet d'entreprise** sous la forme d'un graphe hiérarchique. Au niveau le plus haut, on retrouve un objectif stratégique de l'entreprise, et au niveau le plus bas des actions de changement allant dans le sens de plus de flexibilité industrielle. L'originalité de ce modèle tient dans le fait que le modèle fonctionnel supporte d'une part un *modèle d'évaluation d'investissements et de performances* basé sur une capitalisation des projets antérieurs de l'entreprise, ainsi qu'un *modèle de management des insatisfactions* à différents niveaux hiérarchiques. Une **méthode d'aide à l'évaluation prédictive des performances d'un projet récurrent et à la détermination optimale des investissements** a été proposée. Il s'agit également d'une *méthode d'évaluation d'une stratégie optimale de flexibilité*. Des considérations de systémique ont été utilisées. Voir également les sujets de recherche **(3)** en page 3 et **(11)** en page 11.

2.3.3.2 Préconception de mécanismes

Nous nous sommes intéressés à la préconception de mécanismes plans. Il s'agit d'une problématique d'actualité puisque des travaux de recherche récents ont eu lieu en France. En effet, Sardain [Sardain 1993; Sardain 1994] a proposé une méthode de synthèse topologique et dimensionnelle de mécanismes plans du type générateurs de mouvement. Damay [Damay 1999] a travaillé à une approche générique de coopération de multiples agents dans un environnement de réalité virtuelle avec intervention d'un concepteur. Il l'applique notamment à la synthèse dimensionnelle d'un mécanisme plan générateur de trajectoire. Fauroux [Fauroux 1999], déjà cité, a proposé une méthode de synthèse topologique et dimensionnelle de mécanismes de type réducteurs.

Le problème de la synthèse à la fois topologique (du concept) et dimensionnelle d'un mécanisme plan à barres n'est pas résolu pour tout type de cahier des charges, et ceci, même en se restreignant au niveau des fonctions et contraintes du mécanisme à prendre en compte. On trouve les classes de méthodes de synthèse suivantes :

- **synthèse morphologique**, c'est-à-dire synthèse du concept plutôt que son dimensionnement. La plupart des approches de synthèse morphologique de la littérature procèdent par une énumération automatique des morphologies, basée souvent sur une modélisation par graphes. On assiste alors à une explosion combinatoire du nombre de solutions (voir Hwang [Hwang *et al* 1992]). Peu de solutions satisfaisantes existent synthétisant directement des solutions dignes d'intérêt à partir d'un cahier des charges non trivial (celui-ci est souvent caractérisé par des critères génériques comme : le nombre de degrés

de liberté, le nombre de circuits indépendants ou d'éléments, le nombre de liaisons fixes, le type de conversion de mouvement, le nombre de points de passage imposés...). Cette génération de morphologies est souvent couplée à une synthèse dimensionnelle.

- **synthèse dimensionnelle** (voir Hartenberg et Denavit [**Hartenberg et al** 1964] pour un tour d'horizon des méthodes de synthèse dimensionnelle de mécanismes à barres).
 - *méthodes graphiques*,
 - *méthodes analytiques directes* (voir Sardain [**Sardain** 1993] et Erdman [**Erdman** 1981]),
 - *méthodes d'optimisation*. Dans celles-ci, on distingue encore :
 - les *approches mixtes (analytiques/optimisation)*, comme le *Selective Precision Synthesis* de Kramer et Sandor [**Kramer et al** 1975];
 - celles mettant en œuvre des *équations de synthèse* soit à partir des équations de *fermeture des boucles cinématiques* (voir Hansen [**Hansen** 1993]) soit par la *détermination d'équations paramétriques* du mouvement spécifiques à une morphologie ;
 - les approches procédant par *bouclage sur des simulations cinématiques* afin de calculer pour chaque valeur du vecteur de conception la valeur de la fonction objectif (voir Krishnamurty et Turcic [**Krishnamurty et al** 1992]).

Par rapport aux méthodes graphiques (les plus anciennes) et analytiques, les méthodes d'optimisation vont dans le sens d'une plus grande généralité et complexité de la spécification prise en compte. Intéressons-nous par la suite au cas des mécanismes générateurs de trajectoires (dont la fonction principale est de parcourir une trajectoire définie).

Les **méthodes analytiques** consistent à établir et à résoudre (en fonction d'un nombre réduit de points de passage d'un point *effecteur*) un système d'équations de synthèse. L'inconvénient majeur de cette classe de méthodes est la limitation drastique du nombre de points de passage. En dehors de ces points imposés, on ne contrôle pas la trajectoire. Ce nombre de points dépend en plus de la morphologie du mécanisme et du nombre de variables dimensionnelles fixées préalablement.

Les avantages des méthodes **d'optimisation dimensionnelle** sont de ne pas être limitées au niveau du nombre de points de passage et de ne pas nécessiter que la trajectoire désirée soit atteignable pour des dimensions particulières. Les principaux désavantages des méthodes d'optimisation sont la convergence relativement lente, l'absence de garantie d'obtention d'une solution et la difficulté du choix des valeurs initiales. D'autre part, la plupart du temps, l'optimisation consiste à réduire la distance entre la trajectoire désirée et la trajectoire réalisée. Or, cela ne correspond pas toujours au sens que recherche le concepteur ; celui-ci pouvant préférer une proximité de forme à une proximité de distance.

<i>Positionnement</i>

Nous avons développé 3 méthodes de préconception de mécanismes plans et contribué à une quatrième.
--

La première est une **Méthode de synthèse dimensionnelle de mécanismes plans générateurs de trajectoire par réseau de neurones** développée dans le cadre de la thèse de Vasiliu ([Vasiliu 1997], voir **Fiche de thèse 3** en page 69). Avec un réseau de 17 neurones d'entrée et 5 neurones de sortie, nous synthétisons avec une bonne qualité un mécanisme 4-barres sur un critère de proximité de forme. En effet, nous avons choisi de caractériser une trajectoire par la méthode de McGarva [McGarva 1994; McGarva *et al* 1993] non pas par un ensemble de points de passage mais par les coefficients complexes d'une décomposition en série de Fourier. Une synthèse est immédiate en temps de calcul. Nous avons démontré qu'une **synthèse topologique et dimensionnelle** était possible par bouclage rapide sur une synthèse dimensionnelle pour les morphologies les plus simples des mécanismes à barres. Les publications effectuées sont [2, 24, 37]. Des détails supplémentaires sont disponibles dans le sujet de recherche (7), page 82 et en **annexe 7.6.2**.

La deuxième est une **Méthode de simulation cinématique qualitative et d'optimisation dimensionnelle qualitative d'un mécanisme plan générateur de trajectoire**. Dans cette approche issus des travaux de la mécanique qualitative, les trajectoires désirées sont modélisées en terme d'arcs de cercle et de segments de droite. La synthèse dimensionnelle, basée sur un bouclage sur des simulations qualitatives, privilégie ainsi la forme plutôt que la distance. Les publications effectuées sont [27, 39]. Voir aussi l' **annexe 7.6.4** et le sujet de recherche (6) en page 81.

La troisième méthode a déjà été évoquée dans le chapitre sur la *conception basée sur les cas*. Il s'agit d'une **Méthode de synthèse de mécanismes plans générateurs de trajectoire basée sur des cas dit qualitatifs** développée dans le cadre de la thèse de Vasiliu. Elle est basée sur le modèle de cinématique qualitative précédent. Voir le sujet de recherche (8) en page 83.

La quatrième méthode à laquelle nous avons contribué a été proposée par Chedmail et Damay [Damay 1999] de l'Ecole Centrale de Nantes. Dans le cadre d'une approche générique de conception en environnement virtuel, une **coopération de multiples agents mène à une synthèse dimensionnelle d'un mécanisme plan générateur de trajectoire**. Ces agents s'expriment selon une priorité temporelle différente ; un concepteur pouvant intervenir durant le processus. Un jeu optimal de priorités est trouvé. Les publications effectuées sont [6, 18, 21]. Voir aussi l'**annexe 7.6.3** en page 158 et les sujets de recherche (13) en page 91 et (18) en page 99.

Enfin, le domaine de la synthèse de mécanismes nous a servi d'exemple pour proposer une **typologie des méthodes de synthèse dans le domaine de la conception mécanique**. Voir [9] reproduit en **annexe 7.5.1** et le sujet de recherche (12) en page 89.

2.3.4 Le domaine des « design theories and methodologies »

2.3.4.1 Présentation

Ce domaine se distingue des autres par le fait qu'il n'a pas pour but d'utiliser des techniques d'Intelligence Artificielle ou de travailler spécifiquement dans le domaine de l'ingénierie mécanique, mais il consiste à raisonner sur la science de la conception.

La limite est donc tenue⁴³ entre, d'une part, ce domaine et celui de l'IA en conception (réflexion commune sur les modèles de produits *buts / fonctions / structures / comportements*) et, d'autre part, ce domaine et celui de la conception intégrée et simultanée en ingénierie mécanique :

- Leur point commun est la réflexion sur les heuristiques de conception de produits : comment faut-il concevoir pour que le produit satisfasse aux besoins, pour qu'il soit réparable, montable, évolutif, etc..., comment et où innover... ?
- Leurs points de divergence sont le fait que la conception intégrée et simultanée s'intéresse à un champs plus large de la conception : modèles de processus de conception, systèmes d'information, tolérancement, fabrication, conception collaborative, capitalisation d'expérience, gestion de projet, gestion des compétences...

Ce domaine est né de la nécessité de conceptualiser la conception qui était quelque peu vue avant les années 1960 comme l'activité d'un « homme de l'art ». Perrin explique fort bien dans [Perrin 2001b] comment dans les années 1960 à 1970, la conception a commencé à être théorisée pour devenir le domaine des *design theories* et des *design methodologies*. Ceci a commencé en Angleterre puis aux Etats-Unis et en Allemagne. Quelques professeurs de conception ont théorisé leur savoir dans des ouvrages de référence, ce que nous appellerons les approches générales.

A part ces **approches générales**, ce domaine de recherche est riche en thématiques abordées, nous choisirons d'en aborder quelques-unes ici qui nous semblent importantes en *conceptual design* :

- **l'évaluation multi-critère de solutions,**
- **la représentation de l'imprécision en préconception,**
- **le lien entre paramètres de conception, performances et besoins.**

En France, très peu de chercheurs nous semblent travailler spécifiquement dans ce domaine. Il s'agit d'un domaine majeur de notre thème de recherche et sur lequel nous allons nous recentrer particulièrement dans le futur.

2.3.4.2 Les théories générales

Une approche majeure est celle de la **conception axiomatique** (*axiomatic design*) de Suh [Suh 1993; Suh 1990; Suh 1995; Suh et al 1978]. Cette approche a fait école au niveau de la recherche. Suh considère le processus de conception comme un cheminement séquentiel et itératif entre quatre espaces : le *domaine client*, le *domaine fonctionnel*, le *domaine physique* et le *domaine des processus de mise en œuvre*. Ce cheminement est représenté dans un formalisme matriciel. L'équation **Éq. 1** présente un exemple de matrice de cheminement entre le domaine fonctionnel (*Functional Requirements Space, FRS*) qui comprend les fonctions du système, et le domaine physique qui comprend ses paramètres de conception (*Design Parameter Space, DPS*). Les performances fonctionnelles, tout comme les paramètres de conception, sont associés à des dimensions mesurables. Pour une performance fonctionnelle DF_i , le coefficient A_{ij} exprime la contribution du paramètre de conception DP_j à la valeur de DF_i .

⁴³ Peut être est-elle quelque peu artificielle ?

$$\begin{Bmatrix} DF_1 \\ \vdots \\ DF_n \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & \cdots & A_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{n1} & \cdots & A_{nm} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_1 \\ \vdots \\ DP_m \end{Bmatrix}, \quad \text{where } A_{ij} = \frac{\partial DF_i}{\partial DP_j}$$

Éq. 1

L'approche de la conception axiomatique a pour but essentiel la **mesure de la qualité d'un système en terme d'aptitude à la reconception et à la mise en œuvre**. Pour juger de la qualité d'une conception, Suh prend en considération deux axiomes : *l'axiome d'indépendance* et *l'axiome d'information*. *L'axiome d'indépendance* stipule qu'une conception optimale ne doit pas entraîner de couplage dans la réalisation des fonctions (indépendance) au travers de la structure. Une conception acceptable doit éviter que l'amélioration d'une fonction ne puisse se faire sans la dégradation d'une autre. Atteindre simultanément l'optimum de plusieurs fonctions est plus aisé lorsqu'on peut jouer indépendamment sur le réglage des paramètres structurels (les *DP*). Ainsi, il est préférable d'avoir une matrice *A* diagonale ou triangulaire. Une mesure du degré de couplage est proposée. *L'axiome d'information* stipule qu'une conception est globalement optimale si elle nécessite un minimum d'information. L'information dont il est question ici représente les instructions nécessaires à assurer :

- soit l'adéquation entre le niveau de satisfaction attendu d'une fonction et la performance fournie par le système,
- soit l'adéquation entre la définition du système (ex : dimensionnement) par le concepteur et l'aptitude des moyens de mise en œuvre à y répondre.

Une autre approche générale est celle de la **conception systématique** (*systematic design*) de Pahl et Beitz [**Pahl et al** 1984]. Une typologie intéressante des fonctions techniques d'un système/produit basée sur les flux *y* est proposée ainsi qu'une méthode de reconception. Citons aussi les ouvrages de Cross [**Cross** 1989] et de Roozenburgh et Eekels [**Roozenburgh et al** 1995] et enfin celui de Ullman [**Ullman** 1992].

2.3.4.3L'évaluation multi-critère de solution

L'évaluation multi-critère de solution en fonction des performances du concept est un problème qui se pose à tout moment, surtout lorsque plusieurs alternatives de concept sont encore envisageables, et même lorsque le choix d'un seul concept a été fait pour améliorer globalement le jeu de performances du concept. Cette évaluation met en jeu ce qu'on appelle un **modèle de préférences** permettant d'agrèger les critères de décision qui sont ici les performances. Roy expose dans [**Roy** 1985] les fondements théoriques de *l'aide à la décision multi-critère* (ADMC). Des méthodes directement issues des théories de l'ADMC comme Prométhée II sont utilisées en génie industriel, comme c'est le cas avec L'Eglise dans [**L'Eglise et al** 2000] pour le choix d'une ressource d'équipement. Une autre approche très connue est celle de Saaty [**Saaty** 1977] qui est dénommée A.H.P. pour *Analytical Hierarchical Process*. A.H.P. permet de prendre en compte une hiérarchie d'objectifs à deux niveaux avec un objectif global auquel sont associés un ensemble de critères. A.H.P. préconise de décomposer le processus de décision en trois étapes :

1. pondérer l'ensemble des critères relativement à l'objectif global,
2. pondérer l'ensemble des concepts au regard de chacun des critères,
3. calculer le poids global de chacun des concepts comme la moyenne des poids obtenus sur chacun des critères, pondérée par les poids de ces critères.

Les étapes de pondération élémentaires sont prises en charge par un autre processus : celui du **Tri Croisé** ou *Pairwise Comparisons*, qui permet d'aboutir à une pondération d'un ensemble d'éléments à partir de comparaisons binaires de couples d'éléments faites de manière plus ou moins subjective par le groupe d'experts. On peut remarquer que la **pondération d'objectifs** est soulignée comme étant une étape importante du processus de conception dans de nombreux ouvrages de conception (voir par exemple la typologie des méthodes de conception de Cross dans [Cross 1989]). De manière à ce que de multiples experts puissent donner un avis différent sur les comparaisons binaires ou au contraire soient autorisés à ne pas renseigner une comparaison, De Graan [De Graan 1980] et Lootsma [Lootsma 1982] étendent l'approche du Tri Croisé de Saaty. Nous ne nous étendons pas là-dessus car nous fournissons une bibliographie très détaillée sur le Tri Croisé dans [30], reproduit en **Annexe 7.6.6**.

D'autres approches hiérarchiques **d'agrégation des préférences** sensiblement différentes existent : citons Pahl et Beitz [Pahl et al 1984], Kim et al [Kim et al 2000], Yoshimura et Nomura [Yoshimura et al 2000]. Citons également le *Quality Function Deployment* (Q.F.D.), méthodologie industrielle bien connue de déploiement d'un projet à partir des besoins des clients et par le déploiement successif de matrices (voir Vigier [Vigier 1992]). La méthodologie d'Analyse de la Valeur préconise également des méthodes d'évaluation basées sur de simples matrices de pondération.

<i>Positionnement</i>
<p>Nous avons proposé dans [38] avec Limayem quelques conseils dans le choix des critères fonctionnels d'un cahier des charges fonctionnel.</p> <p>Nous avons proposé dans [34, 35] la modification de deux outils d'Analyse de la Valeur pour l'évaluation multi-critère des solutions.</p>

2.3.4.4 La représentation de l'imprécision en préconception

La question de la **représentation de l'imprécision en conception** est des plus importantes en *conceptual design* car en phase préliminaire de conception l'imprécision concerne aussi bien la quantification du besoin que l'évaluation des performances de concepts. Deux approches coexistent : celle de la *logique floue* et celle de la *théorie des probabilités*. Chacune de ces deux approches permet de modéliser la notion d'imprécision au sens d'un choix parmi un ensemble disjonctif d'éléments.

Dans l'approche basée sur la *logique floue*, une valeur est associée à un coefficient graduel entre 0 et 1 qui traduit le degré de vraisemblance ou de possibilité. Par opposition à la logique bi-valuée (soit 0, soit 1) classique, la logique floue est une logique multi-valuée. Elle permet une représentation qualitative mais, en revanche,

assez fine de la notion d'imprécision, notamment à travers la théorie des possibilités⁴⁴ qui offre une certaine expressivité de concepts (ex : possibilité, certitude, nécessité) propice à mettre en valeur les nuances du raisonnement et du langage naturel.

Dans *l'approche probabiliste*, il s'agit le plus souvent d'estimer la fréquence (les chances) d'occurrence d'une valeur relativement à celles de toutes les valeurs de comparaison jugées possibles. L'approche probabiliste aborde l'imprécision de manière quantitative et donc plus riche mais, en revanche, moins flexible (nuancée) que la logique floue.

Dans [O.F.T.A. 1994], Dubois et Prade, auteurs de nombreux travaux dans le domaine de la logique floue, proposent une revue comparative plus détaillée des deux approches. On peut également consulter Wood et al [Wood et al 1989a] pour une comparaison dans le domaine de la conception préliminaire.

Dong et Wong ont permis dans [Dong et al 1987] de lever une limitation de la **logique floue** dans la manipulation algébrique des nombres flous et particulièrement lors de moyennes pondérées qui sont très utilisées lors de l'aide à la décision en conception. Avec leur méthode du *Fuzzy Weighted Average (FWA)* basée sur l'*algorithme de la coupe- α* , ils évitent ainsi une perte de précision sur les nombres flous issus de formules algébriques. Wood, Otto et Antonsson présentent dans [Wood et al 1992; Wood et al 1989b] une extension du FWA qu'ils baptisent *Method of Imprecision*. Une extension de la *method of imprecision* est réalisée dans [Law et al 1995] par Law et Antonsson pour établir une fonction d'évaluation globale d'une conception par un modèle hiérarchique d'agrégation de préférences sous la forme de moyennes pondérées. La *method of imprecision* est comparée dans [Otto et al 1993] par Otto et Antonsson à la théorie de l'utilité pour effectuer un choix de concept. Scott étudie dans [Scott 1999] le problème de l'agrégation des préférences en proposant un jeu d'opérateurs d'agrégation qui balaie l'étendue des situations de combinaison/compensation des préférences.

L'approche probabiliste, quand à elle, est utilisée par Thurston dans [Thurston 1991] et Thurston et Liu dans [Thurston et al 1991] pour modéliser les performances d'un concept de manière incertaine (par des fonctions de densité de probabilité) comme c'est souvent le cas en conception. La théorie de l'utilité est utilisée pour calculer une utilité globale pour une alternative, fonction des performances de base. Une analyse de sensibilité permet de modifier le concept dans le sens de l'augmentation de l'utilité globale.

La rivalité entre logique floue et approche probabiliste se retrouve sur le terrain des méthodes de pondération de type **Tri Croisé** (*Pairwise Comparisons*). Dans [Van Laarhoven et al 1983], Van Laarhoven et Pedrycz, présentent une version floue des extensions de De Graan [De Graan 1980] et Lootsma [Lootsma 1982] du Tri Croisé de Saaty [Saaty 1977]. Cette approche est à nouveau améliorée par Boender, de Graan et Lootsma [Boender et al 1989]. Mais la prise en compte de l'incertitude dans les méthodes de Tri Croisé s'est également faite au travers des méthodes probabiliste avec notamment l'approche de Herman et Koczkodaj [Herman et al 1996].

⁴⁴ La théorie des possibilités permet de représenter de manière qualitative différentes nuances caractérisant l'imprécision d'une information exprimée dans le langage naturel et confrontée à une échelle numérique. En s'appuyant sur les concepts introduits par la logique floue, elle permet notamment la propagation et l'agrégation d'informations imprécises [O.F.T.A. 1994].

Nous avons proposé une approche de *Tri Croisé de Monté-Carlo* (TCMC) qui généralise toute approche de tri croisé déterministe. Ce faisant, nous avons eu quelques apports théoriques par rapport aux auteurs référencés. Le TCMC est particulièrement bien adapté à la détection des incohérence de jugement du groupe et à son amélioration par l'utilisation d'*indicateurs de cohérence*. Il est également adapté à une utilisation répartie et asynchrone. Les publications effectuées avec Limayem sont [17, 30, 36]. Voir aussi l'**Annexe 7.6.6** et le sujet de recherche **(17)**.

Nous avons développé avec Limayem l'approche *SPEC*. Tout comme l'approche de Thurston [Thurston 1991; Thurston et al 1991], les performances sont estimées par des fonctions de densité de probabilité. Le modèle de préférences présente des originalités : intégration de règles floues et des poids entachés d'incertitude provenant du TCMC. Tout comme Thurston et l'approche de Antonsson, une étude de sensibilités permet de donner les directions de reconception. Les publications effectuées avec Limayem sont [16, 31, 32, 33]. Voir aussi l'**Annexe 7.6.5** et les sujets de recherche **(4)** en page 79 et **(14)** en page 92 ainsi que la **Fiche de thèse 5** en page 71.

2.3.4.5 Le lien entre paramètres de conception, performances et besoins

La problématique du **lien entre paramètres de conception, performances et besoins**, a déjà été évoquée à deux reprises : au niveau de la modélisation et des raisonnements fonctionnels avec notre approche développée avec Canet-Magnet dans [22] et au niveau des travaux de mécanique qualitative avec Neville et Joskowicz [Neville et al 1992] et Faltings et Sun [Faltings et al 1993; Sun 1994]. En *conceptual design*, il est très difficile de développer des méthodes purement de synthèse et il est donc nécessaire de tenter d'effectuer une « superposition » des champs de performances faisables du ou des concepts avec les champs de besoins/spécifications. Dénommons cette superposition : **mapping besoin/faisabilité**. Cette superposition peut être unidirectionnelle ou bidirectionnelle selon que :

- seul l'espace des performances du concept est réduit ; on parle alors de **mapping direct besoin/faisabilité**,
- l'espace des besoins est également réduit pour souligner que seule une partie des spécifications peut être honorée relativement au concept étudié. La différence entre la partie réalisable du besoin et le besoin originel est d'un grand intérêt pour tenter de comprendre les raisons de l'inadéquation partielle et pour indiquer les meilleures pistes de reconception. On parle de **mapping inverse besoin/faisabilité**.

Dans la littérature du *conceptual design*, on constate qu'il existe un deuxième type de *mapping* dont on parle peut-être plus car il a été popularisé par la conception axiomatique de Suh [Suh 1993] et la pratique du Q.F.D. [Vigier 1992]. Il s'agit, lorsqu'en préconception on prend en compte la variabilité du concept et par conséquent l'imprécision concernant ses paramètres de conception, de la projection de ces paramètres de conception sur l'espace des performances au travers des calculs

d'ingénierie (simulations, éléments finis, etc...) et au delà de la projection de ces performances au travers du *modèle de préférences* pour estimer une *utilité globale*. Appellons cette projection : **mapping direct performances/préférences**.

Ces deux mappings peuvent se représenter par rapport aux deux dimensions de la préconception présentées en **Figure 3**.

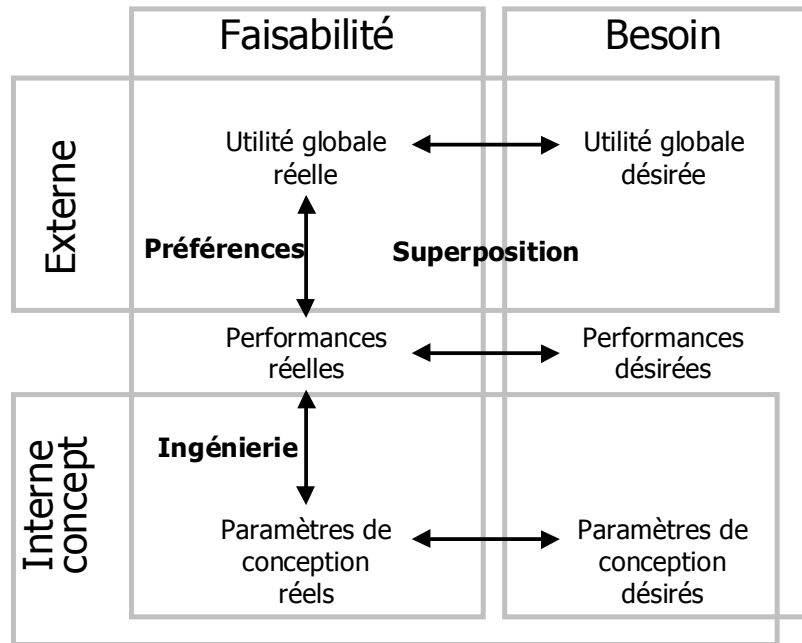


Figure 3 : Les deux dimensions de la préconception

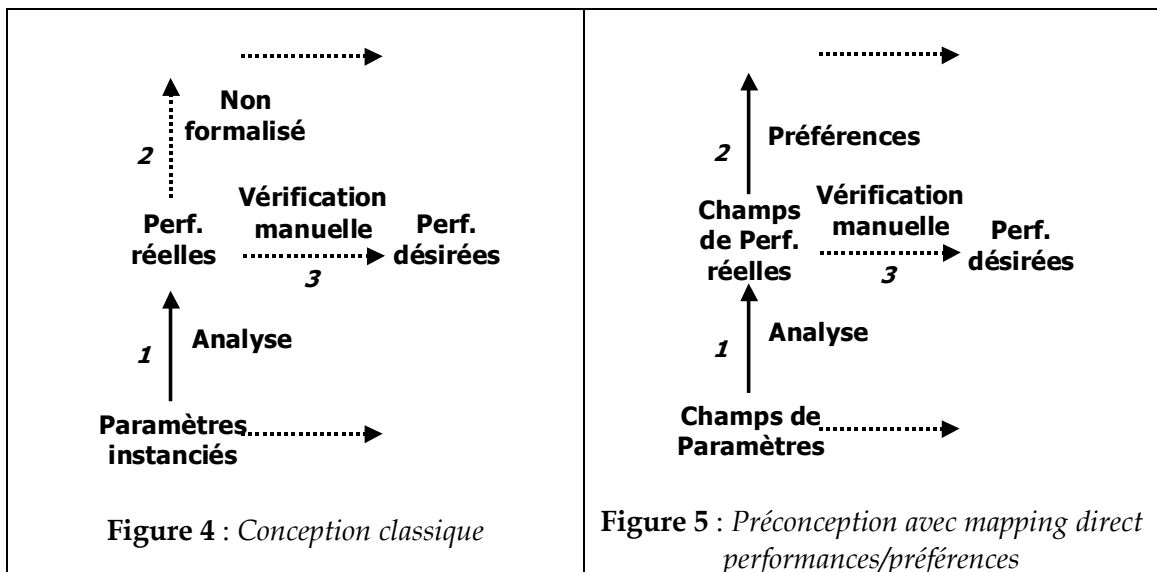
Law et Antonsson [Law *et al* 1996] par exemple utilisent la *Method of Imprecision* pour effectuer une projection de l'espace structurel des paramètres de conception (*Design Variable Space, DVS*) sur l'espace fonctionnel des performances (*Performance Variable Space, PVS*). Le **mapping performances/préférences** peut se faire des paramètres de conception vers les performances (*mapping PP de type 1*, voir **Figure 5**) et/ou des performances vers les préférences de plus haut niveau (*mapping PP de type 2*, voir **Figure 5**).

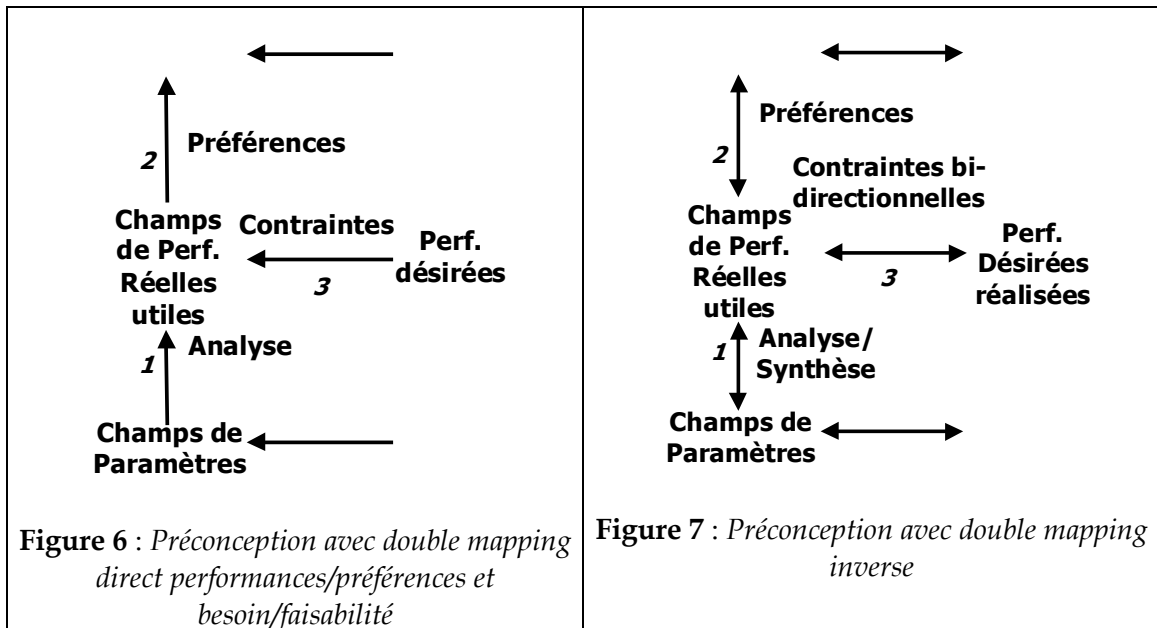
Le **mapping inverse performances/préférences** est beaucoup plus rare car plus difficile à mettre en œuvre mais rappelons que son intérêt est immense puisqu'il s'agit de projeter en temps réel les performances sur l'espace des paramètres de conception pour :

1. Voir s'il reste des possibilités de valuation,
2. Réaliser en quelque sorte une synthèse dimensionnelle.

Il s'agit en quelque sorte de la généralisation de la réduction de domaines de la Programmation Par Contraintes. La difficulté du mapping inverse réside dans le fait

que les procédures d'analyse d'ingénierie entre les paramètres de conception et les performances sont souvent complexes comme par exemple un calcul de déformation ou de contraintes par la méthode des éléments finis. Cette méthode est très coûteuse en temps et pose des problèmes pour tester de nombreuses solutions. D'autre part la fonction $Perf.=f(Param. conception)$ n'est sûrement pas inversible. Elle l'est d'autant moins que la zone de variabilité/imprécision du concept est large. Pourtant, de plus en plus de chercheurs tentent de simplifier ces fonctions f en les approximant. Ces modèles approximés se nomment **métamodèles**, ils sont obtenus par calage d'un modèle mathématique (fonctions polynomiales, radiales, splines, de type réseaux de neurones, de corrélation spatiale...) à partir d'un plan d'expériences soigneusement établi au dessus de l'analyse classique. Ce métamodèle a une réponse instantanée au prix d'une imprécision à maîtriser. Barton établit un état de l'art dans [Barton 1992]. Lin et al utilisent des **évaluateurs de performances sous la forme de métamodèles** pour tester la robustesse d'un concept [Lin et al 2000]. Or ces métamodèles sont beaucoup plus simples à inverser. Barton, Meckesheimer et Simpson abordent ce problème de **mapping inverse performances/préférences** dans [Barton et al 2000a]. **La simplification du lien paramètres de conception/performances/préférences passe par une recherche sur la stratégie d'assemblage de métamodèles élémentaires qui permette d'opérer la rencontre entre les contraintes techniques et fonctionnelles de manière la plus proche des paramètres de conception (alors qu'elle se fait traditionnellement au niveau des performances fonctionnelles).** Cet idéal est décrit dans la Figure 7.





Positionnement

L'approche SPEC que nous avons développée, et dont nous avons parlé dans le chapitre précédent, est une approche de **mapping direct PP de type 2**.

Le professeur Barton de PennState University, USA/PA, et son doctorant Meckesheimer travaillent sur les métamodèles permettant d'effectuer un **mapping direct PP de type 1**. Dans une publication récente [Barton *et al* 2000a] ils abordent avec Simpson la problématique du **mapping inverse PP de type 1**.

Nous avons (nous-mêmes et Limayem) collaboré avec eux à un **mapping direct PP de type 1+2**, des paramètres de conception jusqu'à un indicateur d'utilité globale. Le cas d'étude utilisé a été celui de la conception d'une lampe de bureau. Nous montrons dans [19] que les incertitudes sur les paramètres de conception peuvent se combiner avec celles du modèle de préférences qui s'exprime au travers d'une base de règles floues. Dans une seconde publication [12] (donnée en **annexe 7.6.7**), nous étudions différentes stratégies de métamodélisation du modèle d'évaluation de performance d'éclairage. En effet, des discontinuités opèrent sur la trajectoire d'un rayon lumineux. Plusieurs stratégies génériques sont proposées pour métamodéliser des phénomènes discrets. Ces stratégies sont testées avec succès sur le cas de la lampe de bureau.

Nous envisageons d'aborder dans une prochaine collaboration le **mapping inverse de type 1+2**. Voir le chapitre 5.7 *Prototypage virtuel de concept* en page 121.

La méthode développée dans notre thèse [40] (voir sujet de recherche (5) en page 80) était un **mapping besoin/faisabilité direct et inverse**.

2.3.5 Le domaine des méthodologies industrielles de conception

Les industriels manufacturiers utilisent dans leur pratique de tous les jours des méthodologies plus ou moins imbriquées pour concevoir leurs produits au sein de processus de conception cohérents assurant des résultats acceptables à des coûts maîtrisés. Parmi ces méthodologies, citons les principales : l'Analyse Fonctionnelle (AF), l'Analyse de la Valeur (AV), l'Analyse des Modes de Défaillance de leurs Effets et de leur Criticité (AMDEC), le Quality Function Deployment (QFD), la méthode d'innovation TRIZ, la gestion de projet (GdP). Ces méthodologies peuvent souvent également être perçues comme **établissant un lien entre le besoin et la solution** en cours de conception :

- **L'Analyse Fonctionnelle** définie par les normes AFNOR [FD-X-50-101 ; NF-EN-1325-1 ; NF-X-50-100] standardise les pratiques fonctionnelles dans l'industrie. Elle définit les notions de *fonction de service* externe à la solution et de *fonction technique* interne à la solution. Elle standardise les pratiques de **chiffage du besoin et d'établissement du Cahier des Charges Fonctionnel** (voir Bernard-Bouissières [Bernard-Bouissières 2000]). Des méthodologues (voir Apte [Apte 2000]) ont proposé des outils de *Bloc Diagramme Fonctionnel* et de *Tableau d'Analyse Fonctionnelle* pour, d'une part, visualiser les flux des fonctions externes au travers de la structure de niveau inférieur et, d'autre part, établir les *liens de contribution fonctionnelle* des sous-systèmes d'un niveau donné aux fonctions de service du niveau supérieur.
- **L'Analyse de la Valeur**, définie par les normes [FD-X-50-153 ; NF-EN-1325-1 ; NF-X-50-152], s'intéresse à la manière dont les *coûts* sur les composants se répartissent en coûts sur les fonctions. D'une manière plus générale, Teixido et al [Rak et al 1990; Teixido et al 1995] la définissent comme une méthode de mise en œuvre pertinente des moyens pour passer d'insatisfactions (sur les produits) constatées sur le marché à des objectifs définis par l'AF (voir **Figure 8**). Cette notion d'adéquation nous agréee relativement à notre thème de recherche. Une autre définition est celle de la norme « *L'analyse de la Valeur est une méthode de compétitivité [des entreprises], organisée et créative, visant la satisfaction du besoin de l'utilisateur [client] par une démarche spécifique de conception [de produits, systèmes, services...], à la fois fonctionnelle, économique et pluridisciplinaire. C'est une méthode opérationnelle pour susciter et organiser l'innovation. Une méthode est un ensemble d'outils organisés entre eux suivant une certaine démarche* ». Les ouvrages suivants pourront être consultés pour une présentation de l'AV : ceux de Adam [Adam 1985; Adam 1987], Delafollie [Delafollie 1991], Jouineau [Jouineau 1985], Teixido [Teixido 1995] ou les ouvrages communs de l'AFAV [AFAV 1994; AFAV 1996] ou également Yannou [7].
- Le **Quality Function Deployment** (Q.F.D., voir Vigier [Vigier 1992]) s'intéresse à **l'adéquation des besoins et de la faisabilité technique**.
- **L'A.M.D.E.C.** s'intéresse à la manière dont la *fiabilité* (entre autres propriétés de sûreté de fonctionnement) sur les composants déterminent la fiabilité des fonctions (voir Garin [Garin 1994]).
- Le **diagramme F.A.S.T.** (*Function Analysis System Technique*) est un outil de *support de créativité* pour passer progressivement et de manière raisonnée des fonctions attendues aux solutions en assurant une *traçabilité des choix ou rejets des principes* de conception (voir les ouvrages traitant de l'AV).

- La méthode d'innovation **TRIZ** (voir Cavallucci et Lutz [Cavallucci *et al* 1998] ainsi que Savransky [Savransky 2000]) propose plusieurs outils de reconception basés sur la *remise en question de fonctions techniques* ; on peut citer notamment l'outil *matrice des contradictions* et les *8 lois d'évolution* que suivent statistiquement les systèmes dans leur évolution technique.
- Rappelons que la **théorie de la conception axiomatique** [Suh 1993] donne des *axiomes de ce qu'est une bonne conception* en définissant des propriétés sur cette relation fonctions/structure.

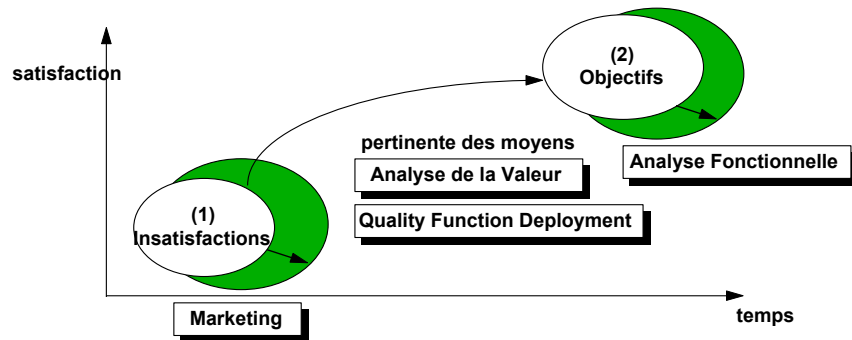


Figure 8 : *L'analyse fonctionnelle et l'analyse de la valeur selon Teixido et al [Rak et al 1990; Teixido et al 1995]*

Effectuons un petit état de l'art des problématiques qui intéressent notre thème de recherche.

La notion de valeur est une notion bien mal partagée. Tout le monde s'accorde à dire qu'il faut augmenter chacun des maillons de la **chaîne de la valeur** (voir Porter [Porter 1986]). Mais cette **notion reste très polysémique** (voir Perrin [Perrin 2001a], Chazelet et Lhote [Chazelet *et al* 2001], et Ben Ahmed [Ben Ahmed 2001]). En conséquence, peu d'indicateurs réellement opérationnels permettent de la chiffrer durant le projet de conception (voir aussi le chapitre 5.5 en page 115) pour concevoir le meilleur produit.

Pourtant des méthodes existent en **marketing** qui sont basées sur la valeur. Goyhenetche [Goyhenetche 1999] propose lors de l'étude de marché de caractériser, avec sa *boussole de la valeur*, les segments de marché par les valeurs attendues et perçues. Volsy [Volsy 2001] propose une méthode chiffrée lorsqu'on dispose d'un retour d'expériences des clients. Malgré cela, Bloch et Manceau [Bloch *et al* 2000] constatent que 30 à 70% des produits nouveaux connaissent un échec.

La notion des **coûts** reste cruciale pour éviter les échecs. Le coût de mise sur le marché doit être estimé au mieux (voir Fouré [Fouré 1982]). Le **coût du projet** doit être maîtrisé (voir Bellut [Bellut 1995] et Perrin [Perrin 1995]). Une manière d'arriver à maîtriser le coût du projet et le prix de revient du produit est la **Conception à Coût Objectif** (voir Bellut [Bellut 1990]). De plus en plus, le client ne raisonne plus seulement en coût d'acquisition, mais également en coût de consommables, d'entretien, de maintenance, et de recyclage/destruction. Cette notion de **Coût Global** intéresse de plus en plus les industriels qui proposent déjà des formules de coûts globaux à leurs clients dans les domaines des systèmes technologiques complexes tels

l'aéronautique ou le nucléaire (voir Gormand [Gormand 1995] et Tassinari [Tassinari 1985]). Cette notion de coût global peut et doit certainement être étendue à des **coûts immatériels** qui ont trop longtemps été négligés tels le coût intellectuel (effort) de formation, d'utilisation, ou l'adéquation avec une valeur morale ou éthique (respect de l'environnement) (voir Quarante [Quarante 2001]).

Les **risques** devraient être estimés à tout moment durant le processus de conception (voir Courtot [Courtot 1996], Le Bissonnais [Le Bissonnais 1997] et Van Dorp et Duffey [Van Dorp *et al* 1999]). De nombreux systèmes de simulation de *risk management* existent (voir Wright et Canal [Wright *et al* 1996]). Pourtant les meilleures méthodes sont celles qui prennent en compte à la fois les risques liés à l'utilisation future du produit/système et ceux liés aux aléas du projet. Une telle méthode est présentée par Laval dans [Laval 1999; Laval *et al* 1998] qui, dans une approche système, envisage les risques dès les premières phases de définition du besoin jusqu'à la phase de livraison au client tout au long du déploiement du projet (cycle en V) dans l'entreprise. Cette méthode est basée sur une prise en compte dans le besoin de toutes les situations dégradées du produit mais aussi de son environnement.

Pour diminuer ces risques d'une part, et inciter à l'innovation d'autre part, les industriels portent de plus en plus une attention accrue à la spécification du besoin, à son évolution et à son déploiement. Avant de concevoir le produit, il faut *concevoir le besoin* et continuer à le *maintenir* durant le projet de conception/développement et il faut le *capitaliser* pour le réutiliser. Même si les méthodes d'AF traditionnelles ont encore bien besoin d'être promues et développées (voir Bernard-Bouissières [Bernard-Bouissières 2000]), **l'ingénierie du besoin** prend de plus en plus d'ampleur (voir Chevallier [Chevallier 2001]) et l'industrie du logiciel a particulièrement développé cet aspect de modularité et de capitalisation du besoin (voir Cauvet *et al* [Cauvet *et al* 2001]). **L'ingénierie système** se fonde elle sur une standardisation des processus d'ingénierie pour déployer des projets de développement de systèmes complexes (voir [ANSI/EIA-632 1998]).

Enfin, le management d'un projet de conception ou le management d'une entreprise ont également besoin d'être spécifiés, conçus, maintenus, évalués et le **Management par la Valeur**, évolution récente de l'AV, tente d'y pourvoir. Grandhaye *et al* [Grandhaye *et al* 2001] et Michel [Michel 2001] l'appliquent aux organisations. De Hemmer [de Hemmer 2001] l'applique à la conception d'un service. Laval et Lochot [Laval *et al* 2001] l'appliquent à la conception d'une politique de collectivité locale dans un esprit de développement durable (domaine dans lequel des compromis très larges doivent opérer).

En conclusion, les méthodologies citées sont pour la plupart basées sur des textes de norme qui non seulement appauvrissent à escient la complexité du problème, mais aussi ne référencent plus les causes et les hypothèses de leurs préconisations, et se gardent le plus souvent d'indiquer les outils de mise en œuvre. Ces méthodologies progressent plus grâce à leurs associations d'industriels pratiquants et de consultants plutôt que par la recherche universitaire. Cela est regrettable car ce sont elles qui influent majoritairement sur les pratiques industrielles. Cela est probablement dû à un cloisonnement des personnes qui n'ont pas l'habitude ou le goût de communiquer. Ces associations sont par exemple l'AFAV en France et SAVE aux Etats-Unis en ce qui concerne l'Analyse de la Valeur. A cet état de fait, ainsi qu'à celui de la diversité des normes, s'ajoute la multiplication des nouvelles méthodologies industrielles. Citons

par exemple, car elles ont un rapport avec notre thème de recherche, les méthodologies suivantes : la Conception à Coût Objectif (CCO), le Management par la Valeur (MV), le *Cost As Independent Variable* (CAIV), le *Earned Value Management* (EVA), l'Ingénierie du Besoin ou *Requirements Engineering*, ...

Pour notre part, nous avons décidé de nous rapprocher des pratiquants industriels de l'AF, l'AV, la CCO, le MV au travers de l'AFAV (voir à ce sujet le **chapitre 4.1.3** en page 103).

Positionnement

Le sujet de thèse de Bacha (voir **Fiche de thèse 6** en page 72) a concerné en partie l'ingénierie du besoin relativement aux systèmes d'informations techniques des entreprises. Voir aussi le sujet de recherche **(19)** en page 100 et les publications [13, 14, 15].

Nous avons proposé dans [34, 35] la modification de deux outils d'Analyse de la Valeur pour l'évaluation multi-critère des solutions et le remise en question de fonctions à reconcevoir. Ces outils sont basés sur une définition plus opérationnelle de la notion de valeur. Voir sujet de recherche **(2)** page 77.

Nous avons effectué plusieurs autres publications sur le thème de l'AF et de l'AV [5, 7, 20, 31, 32, 33, 36, 38].

Nous avons mené l'édition scientifique d'un numéro spécial de la Revue Française de Gestion Industrielle (RFGI) sur le thème du « Management par la Valeur » (numéro d'avril 2001) ; son sommaire est donné en **annexe 7.4**.

2.4 Contexte national de la recherche

Assez peu de chercheurs en France, relativement à la communauté internationale (et toutes proportions gardées), s'intéressent au *conceptual design*. Nous pouvons toutefois rapprocher nos travaux de ceux d'autres chercheurs :

- **Brigitte Trousse** de l'INRIA Sophia-Antipolis s'est intéressée à l'aide à la préconception par le biais du knowledge-based engineering⁴⁵. Tout comme nous, elle a développé des modèles de raisonnement basés sur les techniques de programmation par contraintes. En tant que responsable du projet INRIA AID de « Gestion des connaissances pour l'aide à la conception coopérative », elle s'intéresse maintenant au raisonnement à base de cas, au raisonnement qualitatif, à l'aide à la décision et au travail coopératif. Elle est, à notre avis, la chercheuse française à avoir le plus utilisé des techniques d'Intelligence Artificielle pour développer des outils de conception [Orel *et al* 1995; Trousse 1993].
- **Michel Tollenaere** du laboratoire GILCO de l'INPG de Grenoble s'intéresse d'une manière large à la modélisation des flux d'information et de connaissances (voir [Tollenaere 1995]) dans le contexte du processus de création de l'offre produits (produits mécaniques et services). En ce qui concerne les flux d'information supportés par des Systèmes de Gestion de Données Techniques, il a contribué à développer des modèles informationnels concernant la définition fonctionnelle du produit [Constant 1996] et l'historique des choix et des évolutions des données du produit au sein d'un processus multi-métiers. D'autre part, il a travaillé sur le problème de la gestion dynamique des données techniques au sein des SGDT [Gzara 2000]. Pour ce qui concerne la gestion des connaissances, il a notamment contribué à un modèle de gestion de connaissances dédiées à la collaboration entre les métiers du calcul et de la conception [Troussier 1999], ainsi qu'à un modèle de capitalisation et de réutilisation à base de « design patterns » [Gzara 2000].
- **Améziane Aoussat, Marc Le Coq et Jean-François Bassereau** du laboratoire CPNI de l'ENSAM Paris s'intéressent au processus de conception de produits sous de nombreux aspects [Aoussat 1997], notamment dans un contexte de type Analyse de la Valeur [Aoussat *et al* 1998a] et en prenant en compte dès la conception les contraintes aval d'assemblage [Aoussat *et al* 1998b] et de fabrication, ce qu'on nomme le *design for X*. Ils ont également proposé ou encadré des recherches concernant la métrologie sensorielle permettant de quantifier des spécifications de fonctions subjectives [Bassereau *et al* 1995].
- **Jacques Perrin** de l'INSA de Lyon s'intéresse à la fois aux théories du *conceptual design*, à l'innovation produit [Perrin 2001b] et ceci au travers de leurs implications économiques [Perrin 1995]. Il travaille notamment dans les champs de l'Analyse de la Valeur et du Management par la Valeur [Perrin 2001a].
- **Jean-Claude Bocquet** du laboratoire Productique-Logistique de l'Ecole Centrale Paris s'intéresse principalement à de nouveaux modèles de processus de conception et à de nouveaux paradigmes d'outils de gestion de projets [Marle

⁴⁵ Conception de produits par exécution de règles, de type système expert, raffinant progressivement le modèle de produit.

et al 2001], mais aussi à la cohérence de l'enchaînement et à la complémentarité des méthodologies projet [Martin *et al* 2000]. De plus, il a travaillé à la modélisation des dysfonctionnements en projets pour leur amélioration [Stal-Le Cardinal *et al* 1999] ainsi qu'à la capitalisation des projets complexes [Cantzler *et al* 1995].

- **Olivier Garro** de l'UTBM travaille globalement sur les modalités de conception distribuée particulièrement adaptées à l'acte d'innovation produit (donc en *conceptual design* essentiellement) dans un contexte multi-métiers et, par conséquent, présentant toujours des difficultés pour trouver un langage de représentation commun. Il a particulièrement développé un modèle de représentation de processus de conception collaborative [Garro *et al* 1995], caractérisé sous la forme d'un langage (voir [Garro *et al* 2001]) qui permette d'avoir une traçabilité de l'émergence de l'invention en référençant les actions de chacun et les objets intermédiaires de conception. Cette trace peut être par la suite utilisée pour effectuer des traitements statistiques sur les actions de conception, pour détecter des blocages, et pour caractériser des schémas de collaboration. Il s'intéresse plus à la logique de conception alors que Bocquet s'intéresse plus à la logique du projet.
- **Philippe Deshayes** de l'Ecole Centrale de Lille travaille sur l'épistémologie de l'acte de conception et sur les processus cognitifs mis en jeu dans la conception architecturale [Deshayes 1996].
- **Patrick Chedmail** et son équipe du laboratoire Irc cyn de l'Ecole Centrale de Nantes s'intéressent aux méthodes de conception de mécanismes, de manière très large. Ils travaillent sur la synthèse dimensionnelle et topologique [Chedmail 1998] avec l'utilisation de techniques d'intelligence artificielle en préconception comme la logique floue, les réseaux de neurones et le développement de modèles de conception coopérative par des systèmes multi-agents (voir [Damay 1999] et [6, 18, 21]), ainsi que par des environnements de réalité virtuelle.
- **Philippe Janssen** [Janssen 1990] de l'Université de Montpellier (des Sciences et Techniques du Languedoc) a étudié l'applicabilité des techniques de CSP (*problèmes de satisfaction de contraintes*), plus généralement connues sous le nom de techniques de *programmation par contraintes*, à la conception. Il s'agit d'un travail théorique s'appliquant à la conception dans tout domaine.
- **Xavier Fischer** [Fischer 2000] de l'ENSAM Bordeaux utilise des techniques de programmation par contraintes pour effectuer la conception d'un appareil à pression et pour trouver une solution optimale. Un couplage est réalisé avec un modèle neuronal codant le comportement mécanique d'une plaque.
- **Catalina Vargas** [Vargas 1995], **Florence Sellini** [Sellini 1999] et **Pierre-Alain Yvars** [Yvars 2001] de l'ISMCM/CESTI de Saint-Ouen ont travaillé sur l'utilisation des techniques de programmation par contraintes de manière cohérente avec l'évolution d'un modèle de produit mécanique.
- **Philippe Sardain** [Sardain 1993] a développé une méthode de synthèse de concept de mécanisme plan.
- **Jean-Christophe Fauroux** [Fauroux 1999] a développé à l'INSA de Toulouse une méthode de synthèse et d'optimisation d'un réducteur à partir d'un cahier des charges représentatif.
- **Pascal Duverlié** a proposé à l'Université de Valenciennes un système d'estimation de coûts de fabrication de pièces mécaniques par un raisonnement basé sur les cas [Duverlié 1996].

- **Yasmina Harani** a travaillé à l'INPG sur la capitalisation fine du processus de conception en développant un modèle de produit et un modèle de processus de conception interreliés [Harani 1997]. Ce modèle intègre bien la phase de préconception.

2.5 Contexte personnel de la recherche

2.5.1 Historique de nos recherches

Il y a 10 ans, nous avons opté pour un sujet de thèse qui correspondait à nos aspirations. Le sujet de thèse, tel que très peu formalisé par Dassault Systèmes, consistait à développer une méthode d'estimation des performances cinématiques et dynamiques de concepts de systèmes mécaniques. La problématique de préconception de système mécanique était déjà posée, et plus particulièrement ce qui est devenu l'axe B « Raisonement sur des modèles incomplets ». Nous avons choisi ce sujet car, ayant eu un DEA d'informatique après notre agrégation de mécanique, nous désirions utiliser des techniques d'intelligence artificielle au service de la mécanique, et la préconception est le domaine rêvé pour ce faire (voir [Simon 1991]). Nous avons rapidement choisi d'explorer un domaine émergent d'intelligence artificielle : la *physique qualitative* ou *raisonnement qualitatif*. Bien qu'ayant obtenu des résultats intéressants pour des familles de problèmes de la physique régis par certains systèmes algèbro-différentiels, cette méthode ne se trouvait pas appropriée à la question initialement posée concernant la cinématique et la dynamique des systèmes mécaniques. A la suite de notre thèse, nous avons pu apporter des réponses relativement satisfaisantes en proposant un modèle de *cinématique qualitative* [27, 39], ainsi qu'avec le travail de thèse d'Adrian VASILIU sur la préconception des mécanismes [Vasiliu 1997], et en effectuant un état de l'art sur les méthodes de synthèse envisageables pour les mécanismes [9]. Nous avons donc spécifié nous-mêmes les sujets de thèse d'Adrian VASILIU, puis par la suite ceux de Frej LIMAYEM et de Sinene HAJSALEM. En ce qui concerne Benachir MEDJDOUB et Nathalie PAILLES, ils sont tous deux arrivés au sein du laboratoire Productique-Logistique de l'ECP après un an et demi de thèse en ayant perdu leur financement et leur encadrement (ruptures de contrat des industriels pour des raisons de restructuration). Nous avons accepté de les encadrer en réorientant leurs sujets. Concernant Benachir MEDJDOUB, les orientations données ont été celles de la *synthèse topologique* (déjà présente dans le travail de DEA de VASILIU), de la *programmation par contraintes* (mise en pratique durant la thèse) très adaptée à la préconception et au *conceptual design* en règle générale. Concernant Nathalie PAILLES, les orientations données ont été celles de la *modélisation fonctionnelle*, de *l'aide à la décision* par la *simulation* et *l'optimisation*. Seul le sujet de thèse de Rebiha BACHA a en fait été proposé par un industriel. De plus cette thèse est aussi la seule qui ne se « raccroche » pas naturellement à nos axes de recherche. Ceci pour plusieurs raisons : 1) on aurait pu penser au départ que son sujet porterait sur la mesure « dès que possible » ou la prévision de performances de processus industriels (sujet en rapport avec celui de Nathalie PAILLES), or il s'est orienté définitivement vers la gestion de données techniques de processus, 2) la GDT nous intéresse comme une ouverture vue notre formation en informatique et notre enseignement de la CAO, 3) ce sujet pouvait nous apporter une connaissance importante des processus d'industrialisation sur un produit sophistiqué comme l'automobile, ceci dans l'optique d'aborder le *design for X*.

2.5.2 Positionnement des thèses encadrées par rapport à nos axes de recherche

Par la suite, le **Tableau 5** précise l'axe de recherche (A, B ou C) et les sujets de recherche auxquels se rapportent les thèses que nous avons encadrées.

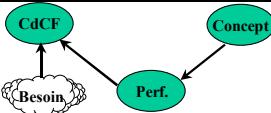
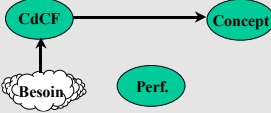

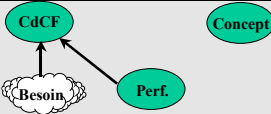
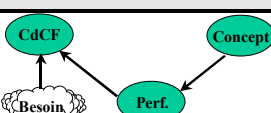
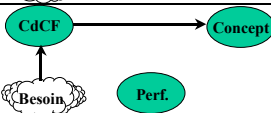
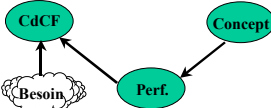
	Titre de la thèse	Axe	Lien avec les phases de préconception de la	Sujet rech.
Bernard YANNOU	Aide à la conception qualitative de systèmes dynamiques	A, B		(5)
Benachir MEDJDOUB	Méthode de conception fonctionnelle en architecture : une approche CAO basée sur les contraintes : ARCHiPLAN	A, B		(1, 10)
Adrian VASILIU	Une approche CAO pour la préconception des mécanismes plans générateurs de trajectoire : REALISME	B		(7, 8, 9)
Nathalie PAILLES	Aproche globale d'aide à la décision d'investissement dans une stratégie de flexibilité pour les projets industriels : Application à l'automobile (ODISAI)	A, B		(3, 11)
Frej LIMAYEM	Modélisation et gestion des spécifications fonctionnelles en phase de préconception de produit	A, C		(4, 14, 17)
Rebiha BACHA	Gestion et intégration des données techniques en ingénierie de production	A, C		(19)
Sinene HAJSALEM	Extension de l'approche SPEC à une prise en compte détaillée des coûts, des valeurs et des risques	A, C		(4, 14)

Tableau 5 : Positionnement des thèses encadrées et de notre thèse par rapport à nos axes et sujets de recherche

2.5.3 Bilan des méthodes scientifiques utilisées

En définitive, même s'il existe quelques *cadres de conception* généraux [Cross 1989; Pahl *et al* 1984; Roozenburgh *et al* 1995; Suh 1993; Ullman 1992], les chercheurs en *conceptual design* développent souvent des approches spécifiques ou « opportunistes ». Nous avons nous-mêmes tenté d'appliquer au mieux certaines méthodes pour certains sous-problèmes de la préconception, en identifiant à chaque fois si cette utilisation pouvait être généralisée à ce sous-problème pour tout produit ou si cette application devait se faire au cas par cas en fonction du problème de conception. Quelques règles générales sont données à ce propos dans [9] en ce qui concerne les méthodes de synthèse en conception mécanique (publication reproduite en **annexe 7.5.1**).

De manière à y voir un peu plus clair, nous proposons dans la **Figure 9** de reprendre le modèle du processus de préconception de la **Figure 1** en adjoignant à

chaque étape les fonctions génériques du besoin en préconception de produits. De manière à mieux caractériser et cartographier notre utilisation des méthodes scientifiques et nos travaux de recherche et donc de manière à montrer où nous avons regardé et ce que nous avons fait, nous présentons dans le **Tableau 6** les solutions (choix de méthode et publications) que nous avons tenté d'apporter aux fonctions énoncées.

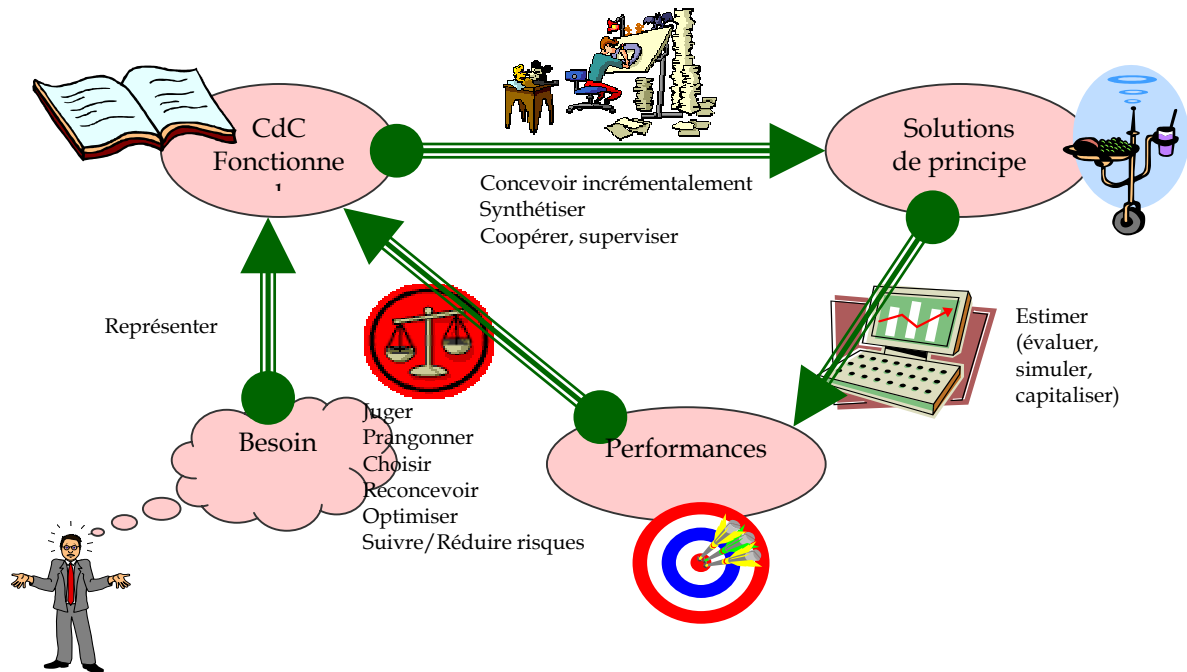


Figure 9 : Les fonctions des modèles et méthodes en préconception de produits

2.5.4 Bilan des spécificités de nos travaux

Résumons les spécificités et les points originaux de nos recherches :

- **Physique qualitative** : 3 méthodes ont été développées (sujets 5, 6, 8)
- **Méthodes de synthèse** : 6 méthodes ont été développées (sujets 7, 8, 9, 10, 12, 13)
- **Conceptual Design, Raisonnement sur des concepts ou des topologies** : 4 méthodes ont été développées (sujets 5, 8, 9, 10)
- **Mécanismes plans et préconception** : 3 méthodes (sujets 6, 7, 8) ont été développées et nous avons contribué à une quatrième (sujet 13)
- **Optimisation** : 7 travaux ont nécessité l'utilisation de méthodes d'optimisation souvent différentes (sujets 6, 7, 9, 10, 11, 13, 16)
- **Modèles fonctionnels** : 4 modèles ont été développés (sujets 1, 2, 3, 4). Ces modèles sont des modèles enrichis qui supportent notamment des *modèles de préférences/satisfaction* permettant à des moteurs d'optimisation de trouver les meilleures solutions correspondant au besoin.

- **Le modèle SPEC** (sujets 4, 14) est une approche générique qui nous semble être particulièrement prometteuse et relativement facilement utilisable dans la phase de préconception essentiellement.
- **Prototypage virtuel de concept** (sujet 15). Cette approche détaillée au **chapitre 5.7** en page 121, et qui consiste à optimiser un concept avant de commencer la conception de détail, nous apparaît également prometteuse.

<i>Fonctions</i>	Méthodes/outils scientifiques	Publications
<i>Formaliser besoin ...</i>	Analyse Fonctionnelle	[1, 5, 16, 20, 22, 23, 25, 26, 31, 32, 33], [Medjdoub 1996; Paillès 1999]
	Ingénierie système	[32], [Paillès 1999]
	Modèles de satisfaction	[5, 11, 16, 17, 20, 22, 30, 31, 32, 33, 38], [Paillès 1999]
<i>...qui soit imprécis, incertain</i>	Logique floue	[20, 36]
	Approches probabilistes	[16, 17, 19, 30, 31, 32, 33]
<i>Concevoir incrémentalement</i>	Modélisation lien fonctions/structure	[22], [Vasiliu 1997]
<i>Synthétiser (dimensions, topologies)</i>	Réseaux de neurones	[2, 9, 24], [Vasiliu 1997]
	Case-based design	[Vasiliu 1997]
	Programmation Par Contraintes	[1, 3, 8, 23, 25, 26]
<i>Coopérer, superviser</i>	Systèmes Multi-Agents	[6, 18, 21]
	Programation par contraintes	[8]
<i>Evaluer performances</i>	Plate-forme coopérative	[30]
	Modèles paramétriques	[Paillès 1999]
	Métamodèles	[12, 19]
<i>Simuler des modèles incomplets</i>	Physique qualitative	[4, 10, 27, 28, 29, 39, 40]
	Programmation Par Contraintes	[1, 3, 8, 23, 25, 26], [Medjdoub 1996]
	Dynamique des systèmes	[Paillès 1999]
<i>Capitaliser solutions</i>	Réseaux de neurones	[2, 9, 24], [Vasiliu 1997]
	Case-based design	[Vasiliu 1997]
<i>Juger, parangonner, choisir</i>	Modèles de satisfaction	[5, 11, 16, 17, 20, 22, 30, 31, 32, 33, 38]
	Aide à la décision multi-critères	[17, 30]
	Analyse de la Valeur	[7, 32, 34, 35]
<i>Reconcevoir</i>	Analyse de sensibilités	[12, 16, 19, 31, 32, 33] [Paillès 1999]
	Analyse de la Valeur	[7, 32, 34, 35]
<i>Optimiser</i>	Recherche Opérationnelle	[6, 12, 18, 19, 21, 27, 39], [Paillès 1999; Vasiliu 1997]
	Recherche tabou	[Vasiliu 1993]
	Colonies de fourmis	Travail en cours
	Programmation Par Contraintes	[1, 3, 8, 23, 25, 26]
	Réseaux de neurones	[2, 9, 24], [Vasiliu 1997]
<i>Suivre/réduire risques</i>	Risk management	[16, 31, 32, 33]

Tableau 6 : Méthodes scientifiques que nous avons utilisées pour répondre aux fonctions en préconception de produit

3. Contenu de nos travaux

3.1 Description des thèses encadrées

Ce chapitre ne contient qu'un résumé succinct des 5 thèses déjà encadrées (en y adjoignant la notre).

Si le lecteur désire approfondir le contenu scientifique de celles-ci, il pourra se reporter au (aux) sujet(s) de recherche qui s'y rapporte(nt) et qui suivront ce chapitre, sachant qu'un positionnement par rapport à la littérature a déjà été fait dans les chapitres précédents.

Nous rappelons la remarque effectuée en « note au lecteur » au tout début de ce document.

Nous avons pris le parti de scinder notre thème de recherche en axes de recherche et les axes de recherche en sujets de recherche. Chaque thèse encadrée se retrouve ainsi dans un, deux ou trois sujets de recherche, ce qui présente l'avantage de pouvoir se focaliser sur un modèle de représentation ou sur une méthode de raisonnement pour en voir l'originalité. Si le lecteur se trouvait dérouté, il est invité à lire à la suite les descriptifs de sujets de recherche se rapportant à une même thèse.

Fiche de thèse 1

Nom Prénom : YANNOU Bernard

Fonction actuelle : Maître de Conférences à l'Ecole Centrale Paris

Formation initiale : Ancien élève de l'ENS Cachan, Agrégé de Mécanique, DEA d'informatique

Directeur de thèse : Jean-Claude Bocquet

Sujet de thèse : Aide à la conception qualitative de systèmes dynamiques

Type de thèse/financement : Allocataire Moniteur Normalien (A.M.N.). Le sujet de thèse a fait l'objet d'un contrat avec Dassault Systèmes (1,2 MF)

Date de début : 01 09 90

Date de soutenance : 11 01 94

Mention : Très honorable avec félicitations

Jury :

Jean-Pierre PELLE	ENS Cachan	Président
Serge TICHKIEWITCH	INPG	Rapporteur
Louise TRAVE-MASSUYES	LAAS Toulouse	Rapporteur
Jean-Claude BOCQUET	ECP / PL	
Patrick BOURSEAU	ENSCP / LIMHP	
André CLEMENT	Dassault Systèmes	
Leo JOSKOWICZ	IBM New-York	

Mots Clés : Physique qualitative, conception préliminaire, système dynamique, équations algèbro-différentielles

Objectif : Traditionnellement la modélisation (ou conception) d'un système physique (régé par un système d'équations algèbro-différentielles) passe par :

- la proposition d'alternatives de systèmes d'équations paramétrés
- pour chaque alternative, une détermination automatique des paramètres ou une valuation arbitraire des paramètres suivie par des simulations dynamiques.

Le but de ce travail était de définir une méthode qui soit capable d'estimer directement le degré d'adéquation entre un système paramétré et les observations comportementales qualitatives qu'on en a.

Méthode (s) utilisée (s) : La méthode développée QDES (« Qualitative Design »), basée sur des concepts de *physique qualitative*, permet de juger de l'adéquation entre le résultat d'une simulation qualitative d'une alternative de système d'équations et d'une liste de comportements dynamiques qualitatifs. Les deux aspects sont représentés sous la forme de graphes d'états dynamiques qualitatifs. Un chemin dans un graphe représente un comportement dynamique qualitatif.

Principaux résultats scientifiques : L'opération principale d'*intersection* de QDES consiste à détecter quels sont les comportements qualitatifs observés qui sont aussi des comportements potentiels de l'alternative de système paramétré. Ce résultat est obtenu par un algorithme d'intersection de graphes. L'intérêt de cette méthode est de pouvoir invalider au plus tôt des modèles génériques de systèmes d'équations qui n'ont aucune chance de représenter des comportements dynamiques observés. Cette méthode est particulièrement intéressante pour trouver la forme du système d'équations d'un phénomène physique continu mal connu. Il a été appliqué à des exemples de biologie, de chimie et de mécanique.

Publications : [4, 10, 28, 29, 40].

Voir l'**annexe 7.5.2**, pages 13-23.

Voir le sujet de recherche **(5)**.

Fiche de thèse 2

Nom Prénom : MEDJDOUB Benachir

Fonction actuelle : Ingénieur de recherche, Martin Research Center, Cambridge, UK.

Formation initiale : Architecte DPLG

Directeur de thèse : Bernard Yannou (85%), Jean-Claude Bocquet (15%)

Sujet de thèse : Méthode de conception fonctionnelle en architecture : une approche CAO basée sur les contraintes : ARCHiPLAN

Type de thèse/financement : Poste d'assistant

Date de début : 01 05 94

Date de soutenance : 07 05 96

Mention : Très honorable

Jury :

Paul QUINTRAND	GAMSAU / CNRS	Président
Jean-Marc BRUN	Université Claude Bernard, Lyon 1	Rapporteur
Michel LEGLISE	Ecole d'architecture de Toulouse	Rapporteur
Bernard YANNOU	ECP / PL	
Robert MACULET	Université de Provence	
Jean-Claude BOCQUET	ECP / PL	
Ian SMITH	Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne	

Mots Clés : CAO architecture, conception fonctionnelle, placement sous contraintes, allocation spatiale, esquisse, niveau topologique, optimisation, modélisation orientée objet, programmation par contraintes

Objectif : Le problème traité est celui du dimensionnement et du placement optimal de locaux sur une surface donnée (on trouve aussi *allocation spatiale*), de type logements familiaux, bureaux ou équipements collectifs... L'objectif était de développer une nouvelle approche de logiciel de CAO en architecture qui parte de l'expression du besoin fonctionnel en termes de contraintes sur les locaux et qui aboutisse à des solutions de placements satisfaisant les contraintes. Le problème, vieux de 20 ans, proposait jusqu'alors des méthodes d'énumération exhaustive dans un temps rédhibitoire ou des méthodes d'optimisation sous-optimales souvent basées sur des heuristiques (ex : systèmes experts, algorithmes génétiques).

Méthode (s) utilisée (s) : L'originalité de ce travail est de proposer un modèle de placement à trois niveaux : fonctionnel, topologique et géométrique. Dans une seconde étape, le logiciel ARCHiPLAN qui a été développé, énumère toutes les solutions topologiquement différentes, sans présumer pour autant de dimensions finales précises. Ces solutions correspondent à l'étape d'esquisses qu'effectue un architecte en phase de conception préliminaire à partir du cahier des charges fonctionnel (programme). L'architecte peut ensuite « naviguer » dans cet espace de solutions topologiques, en faible nombre, et en choisir certaines pour une étude plus poussée. Pour chaque solution topologique, la meilleure solution dimensionnelle est trouvée au regard de critères de coûts, de surfaces utiles, de trame ou autres. Cette approche, qui combine la programmation orientée objet et les techniques de programmation par contraintes, a l'avantage d'éviter le problème récurrent de l'explosion combinatoire grâce à ce modèle à trois niveaux, tout en se rapprochant de la pratique du concepteur du domaine par une méthode fonctionnelle et progressive. Le logiciel ARCHiPLAN a prouvé sa robustesse, sa pertinence et sa souplesse en conception ainsi que sa rapidité sur de nombreux exemples de la littérature en en proposant de nouveaux.

Principaux résultats scientifiques :

- Définition d'un Cahier des Charges Fonctionnel d'un plan de masse en architecture sous la forme d'un *graphe fonctionnel*
- Proposition d'un modèle d'objets et de contraintes d'architecture
- Définition originale d'une *solution topologique* qui soit l'équivalent d'une esquisse d'architecte
- Méthode de synthèse des *solutions topologiques réalisables* en un temps acceptable pour des problèmes de taille pratique (20 pièces)
- Optimisation d'une solution topologique

Publications : [1, **3**, 23, 25, 26], [Medjdoub 1996]

Voir l'**annexe 7.6.1**

Voir les sujets de recherche (**1, 10**)

Fiche de thèse 3

Nom Prénom : VASILIU Adrian

Fonction actuelle : Chef de projet développement, société ILOG S.A., 9 rue de Verdun, BP85, 94253 GENTILLY Cédex

Formation initiale : Ingénieur de l'école Polytechnique de Bucarest

Directeur de thèse : Bernard Yannou (85%), Jean-Claude Bocquet (15%)

Sujet de thèse : Une approche CAO pour la préconception des mécanismes plans générateurs de trajectoire : REALISME

Type de thèse/financement : Poste d'assistant

Date de début : 01 09 93

Date de soutenance : 01 02 97

Mention : Très honorable avec félicitations

Jury :

Jorge ANGELES	Université Mc Gill, Montréal	Président
Patrick CHEDMAIL	Ecole Centrale Nantes / Irccyn	Rapporteur
Claude BOHATIER	Université de Montpellier II	Rapporteur
Jean-Pierre MERLET	INRIA Sophia-Antipolis	
Jean-Claude BOCQUETECP / PL		
Bernard YANNOU	ECP / PL	

Mots Clés : préconception, analyse cinématique, synthèse dimensionnelle, groupes d'Assur, approche systémique, cinématique qualitative, optimisation dimensionnelle, réseaux neuronaux, analyse harmonique, raisonnement à base de cas

Objectif : Ce travail porte sur la préconception d'une classe de mécanismes plans à barres articulées, les générateurs de trajectoire, dont la fonction utile est la trajectoire décrite par un point effecteur. Les méthodes existantes étant plus particulièrement adaptées à la conception détaillée qu'à la préconception, le présent travail a eu pour but d'aboutir à de nouvelles méthodes d'analyse et de synthèse prenant en compte une plus grande diversité de besoins, notamment pour des spécifications de trajectoire en termes de forme plutôt que classiquement en termes de listes de points.

Méthode (s) utilisée (s) : La plate-forme de préconception REALISME développée utilise deux modèles de cinématique : un modèle de simulation systémique multipolaire, et un modèle de simulation cinématique qualitative. Ces deux modèles ont pour avantages de permettre de réaliser des simulations cinématique très rapides et de fournir des informations utiles en préconception. Elles se sont avérées appropriées pour développer des méthodes de synthèse de mécanismes à partir de leur cahier des charges.

Principaux résultats scientifiques :

- Algorithme heuristique de dépliage de graphe (méthode Tabou)
- Méthodologie de conception pas à pas avec indications pertinentes de reconception
- 2 méthodes d'optimisation : exacte et qualitative
- 2 méthodes de synthèse par capitalisation de cas : par Réseau de Neurones Artificiels et par Raisonnement basé sur les cas (et sur une cinématique qualitative)

Publications : [2, 9, 24, 37], [VasilIU 1993], [VasilIU 1997]

Voir les annexes 7.6.2 et 7.5.1.

Voir les sujets de recherche (7, 8, 9).

Fiche de thèse 4

Nom Prénom : PAILLES Nathalie

Fonction actuelle : Développement de méthodologies de contrôle de gestion sur les projets recherche, à la Direction de la Recherche de PSA

Formation initiale : Ingénieur Robotique – Mastère de Génie Industriel de l'Ecole Centrale Paris

Directeur de thèse : Bernard Yannou (**85%**), Jean-Claude Bocquet (**15%**)

Sujet de thèse : Approche globale d'aide à la décision d'investissement dans une stratégie de flexibilité pour les projets industriels : Application à l'automobile (ODISAI).

Type de thèse/financement : Contrat Renault S.A. au début de la thèse, puis poste d'assistante

Date de début : 01 09 95

Date de soutenance : 23 03 99

Mention : Très honorable avec félicitations

Jury :

Pierre BORNE	EC Lille / LAIL	Président
Yvon PESQUEUX	HEC, Jouy-en-Josas	Rapporteur
Michel TOLLENAERE	INPG / ENSGI	Rapporteur
Christian FRAY	Renault S.A.	
Michel JANNETEAU	Apte S.A.	
Jean-Claude BOCQUET	ECP / PL	
Bernard YANNOU	ECP / PL	

Mots Clés : flexibilité industrielle, aide à la décision d'investissement, analyse fonctionnelle, approche systémique, déploiement des objectifs, évaluation des performances, optimisation, simulation continue, gestion de projet, projets automobiles, management participatif

Objectif : Ce travail porte sur une méthode d'aide à la décision d'investissement dans des stratégies de flexibilité adéquates et robustes. Il s'inscrit dans le cadre du dimensionnement d'avant-projet des projets routiniers. Actuellement, le concept de la flexibilité fait l'objet de multiples définitions pour relativement peu d'outils pertinents, en particulier permettant de faire le lien entre des actions mises en œuvre et leur conséquences sur la valeur des projets (rapport satisfaction/coût).

Méthode (s) utilisée (s) : Ce travail s'appuie sur deux modèles et deux méthodes. Un premier modèle est celui du modèle fonctionnel des objectifs des projets d'entreprise. L'application de l'analyse fonctionnelle à une décomposition systémique/structurelle des projets favorise la clarification et la cohérence des liens de but à moyen.

Un deuxième modèle : le modèle d'évaluation d'investissements et de performances permet de quantifier l'impact d'actions choisies sur les performances globales du projet. Il permet une dynamique basée d'une part sur l'évaluation des performances (approche *bottom-up*), d'autre part sur la propagation des insatisfactions des fonctions à tous niveaux (approche *top-down*). Cette propagation des insatisfactions traduit les différents compromis inter-métiers et permet de prendre en compte différents types de management.

L'évaluation d'une stratégie optimale de flexibilité s'effectue ensuite selon deux méthodes : par optimisation et par simulation. La première qui utilise un algorithme de *programmation linéaire*, ne tient pas compte des compromis, elle s'effectue dans le cadre d'un *management directif* idéal où tout le monde est sensé connaître les objectifs de plus haut niveau. La seconde qui utilise un logiciel de *dynamique des systèmes* : VENSIM, tient compte des compromis et propose plusieurs scénarios d'adaptation pour différents types de management, à enveloppe budgétaire donnée.

Principaux résultats scientifiques : Les résultats observés par les deux approches sont étayés par l'application de la démarche sur un cas d'étude : les projets automobiles. Ils sont exploitables à partir d'une interface utilisateur développée sous le logiciel VENSIM : O.D.I.S.A.I. Outre une étude de la satisfaction globale et de la valeur des projets, à enveloppe budgétaire donnée, il est effectué une analyse de risque pour les projets de ne pas atteindre les résultats escomptés ainsi qu'une analyse de leur aptitude à s'adapter à des évolutions externes.

Publications : [11], [Paillès 1999]

Voir les sujets de recherche (**3, 11**)

Fiche de thèse 5

Nom Prénom : LIMAYEM Frej

Fonction actuelle : Doctorant ECP

Formation initiale :

1996 : DEA Génie des Systèmes Industriels – Laboratoire Productique Logistique – Ecole Centrale Paris.

1991-95 : Ingénieur principal en Génie industriel - Ecole Nationale des Ingénieurs de Tunis.

Directeur de thèse : Bernard Yannou (**90%**), Jean-Claude Bocquet (**10%**)

Sujet de thèse : Modélisation et gestion des spécifications fonctionnelles en phase de préconception de produit.

Type de thèse/financement : Thèse MESR, contrat EDF sur 2 cas d'étude (53 KF)

Date de début : 01/11/1996

Date probable de soutenance : 06/2001

Mots Clés : Raisonnement Fonctionnel, Gestion de projet, Risques, Monté Carlo, Logique Floue

Objectif :

- Modéliser un projet sous forme d'un ensemble de besoins (fonctions) et de moyens de satisfaction.
- Gérer l'évolution des besoins et des moyens de les satisfaire et en mesurer l'adéquation, notamment en phase de préconception de produit.
- Identifier les zones (adéquation besoin/moyen) à risque et préconiser des actions en reconception.

Méthode (s) utilisée (s) :

- Raisonnement fonctionnel, Simulation de Monté Carlo, Tri Croisé de Monté Carlo.

Principaux résultats scientifiques :

- Mise au point de la méthode de pondération d'objectifs (en groupe) dite du « Tri Croisé de Monté Carlo » qui permet une généralisation de toutes les méthodes de « comparaison binaire déterministe » à la notion d'imprécision/incertitude.
- Mise au point d'un modèle de gestion des risques couplés produits/projets en suivi de projet baptisée « SPEC : Suivi de Performances En Conception »

Principaux résultats industriels :

- Mise au point de deux maquettes informatiques, respectivement pour les méthodes TCMC et SPEC pour tester en industrie les concepts introduits par ce travail de thèse.
- Sensibilisation des industriels à l'intérêt de ces méthodes et mise en place de collaborations, notamment avec EDF qui a proposé deux stages de DEA au laboratoire pour tester ces approches et les enrichir vis-à-vis de leur problématique spécifique.
- Industrialisation du TCMC en cours.

Publications : [5, 12, 16, 17, 19, 20, **30**, 33, 36, 38]

Voir les **annexe 7.6.6 et 7.6.5**

Voir les sujets de recherche (**4, 14, 17**)

Fiche de thèse 6

Nom Prénom : BACHA Rebiha

Fonction actuelle : doctorante, ingénieur de recherche à Renault S.A.

Formation initiale : Ingénieur en Informatique (INS de Tizi-Ouzou – Algérie)
DEA en Génie Industriel (ENSGI-INPG Grenoble)

Directeur de thèse : Bernard YANNOU (90%), Jean-Claude Bocquet (10%)

Sujet de thèse : Gestion des Données techniques en Ingénierie de Production : Modèles de spécifications et démarche pour la conduite du développement des Systèmes d'Information Techniques en entreprise.

Type de thèse/financement : Contrat Renault S.A. (540 000 FHT), Direction de la Recherche - Renault S.A.

Date de début : 01 01 1999

Date probable de soutenance : 01 09 2001

Mots Clés : Information System Architecture (ISA), process engineering data management, business engineering, enterprise modeling, object modeling, data integration.

Objectif : Partant des constats suivants :

- Les Bases de Données (BdD) dans les bureaux d'ingénierie de production sont locales et liées à chaque outil d'Ingénierie de Process (IPAO), ce qui engendre des ressaisies, des redondances et des vocabulaires hétérogènes.

- En avant-projet, les données sont souvent informelles et les Systèmes d'Information (SI) d'aujourd'hui ne couvrent plus le volume des informations process de plus en plus important.

Notre objectif est donc de pallier à ces problèmes par une meilleure fédération des informations process et par la mise en place d'une technologie de type « Système de Gestion de Données Techniques » (SGDT). L'architecture de notre modèle est composée de :

- Nomenclatures des objets standards : (Produit, Process et Ressource)

- Cas d'utilisation des objets : traduisant les activités entreprises du process (implantation, simulation, chiffrage...)

- Configurations de l'usine : cette partie décrit l'architecture générale d'un site de production, ses paramètres de fonctionnement, en tenant en compte des hypothèses du projet.

- Spécificités de la Gestion de Données Techniques (GDT) : ce pôle traduit les fonctionnalités de la GDT indépendamment du métier que l'on étudie. Nous modélisons ainsi le cycle de vie des objets, le versionnement et les indices des fichiers et objets process et assignons le rôle des acteurs pour contrôler les modifications.

Méthode (s) utilisée (s) : Ce travail se base sur le métamodèle de Zachman : une architecture de SI qui intègre toutes les vues de l'entreprise –illustrées communément par les questions "Quoi? Comment? Qui? Où? Quand? Pourquoi?"- et à différents niveaux d'abstraction (contextuel, conceptuel, logique et technologique). Nous avons modélisé chaque vue et niveau à l'aide des diagrammes des méthodes standards :

- Catalyst (proposée par CSC) pour le "Business Modeling";

- UML et les modèles relationnels pour la modélisation des objets/données.

Principaux résultats scientifiques :

- Proposition d'une démarche systématique de conception des SI produit/process, basée sur l'intégration de deux approches : Systémique (Top-Down : en analysant les processus opérationnels du périmètre) et du Génie logiciel (Bottom-up : en réutilisant les BdD relationnelles existantes).

- Modèle objet réutilisable, traduisant les objets métier et leurs cas d'utilisation en Avant-projet, prêt à l'implémentation dans une technologie GDT.

- Utilisation de quelques design pattern ("composite" de Gamma, "Method Factory" de M. Fowler)

Principaux résultats industriels :

- CdC technique : Spécifications fonctionnelles du projet de maquettage du modèle objet sur une technologie GDT.

- Etude des outils de BPR et de conception de SI – Choix d'une solution.

- Evaluation des solutions GDT orientés "métier process" des grands éditeurs du domaine.

-Cartographie du périmètre d'étude (processus opérationnels, outils logiciels, données, jalons, acteurs)

Publications : [13, 14, 15]

Voir le sujet de recherche (19)

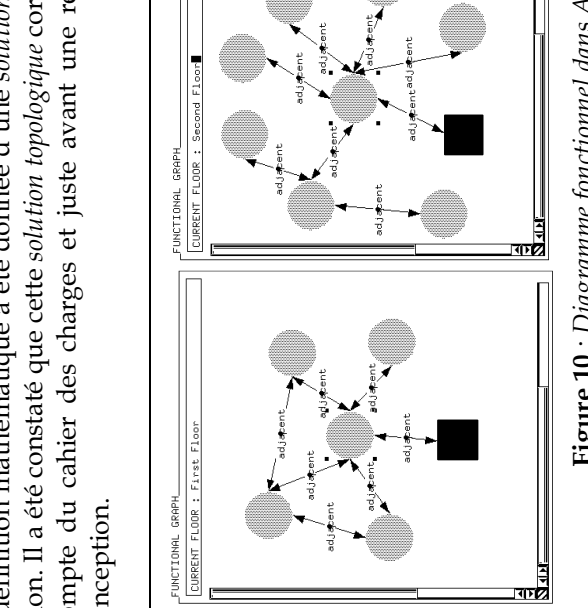
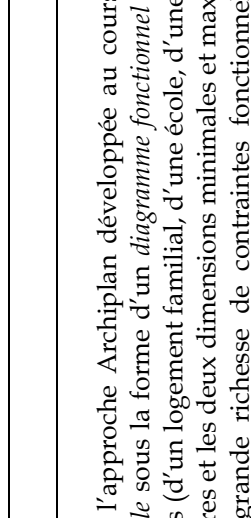
3.2 Description des DEA encadrés

	Etudiant	Taux encadr	Sujet du mémoire de DEA	Axe
1993	Adrian VASILIU	90%	Un algorithme de dépliage des graphes : le TGU (voir (9))	B
1994	Salah DHOUB	90%	<p>Un esquisseur CAO 2D basé sur la programmation par contraintes</p> <p>Les modeleurs CAO dits « sous contraintes » de type paramétrique et variationnel passent souvent par une ou plusieurs étapes de définition de section pour définir une forme tridimensionnelle. Cette définition de section se fait au sein d'un outil dénommé <i>esquisseur</i> ou <i>sketcher</i>. L'avantage d'un modeleur variationnel est de pouvoir travailler sur des modèles géométriques sous-contraints. Or, le sketcher représente à l'écran une solution dimensionnelle possible parmi un ensemble. La représentation des degrés de liberté restants de la géométrie et des amplitudes maximales de variation des cotes serait d'un grand intérêt pour le concepteur dans sa recherche de dimensionnement optimal.</p> <p>La technique de « Programmation Par Contraintes », permet en théorie de résoudre ce problème puisque son but est de réduire les domaines de définition (intervalles) des variables contraintes dès que possible. Ainsi, pour un état contraint de la géométrie, on pourrait voir la réduction des possibilités de conception au fur et à mesure de l'affinement de celle-ci.</p> <p>Une maquette de <i>sketcher</i> basée sur la technique de PPC a été développée et a démontré les fonctionnalités attendues.</p>	B
1996	Frej LIMAYEM	90%	<p>Prise en compte de données incertaines et imprécises dans l'établissement d'un cahier des charges fonctionnel</p> <p>Les problèmes de modélisation de l'incertitude des spécifications et de la confrontation avec les performances probables de solutions en cours de développement est posé. Travail précurseur de l'approche SPEC. Un algorithme de <i>Tri Croisé Flou</i> a été proposé dans [36].</p>	A
1997	Laurent GANNE	90%	<p>Spécifications fonctionnelles pour l'aide à la conception coopérative. Une évaluation de diverses approches de conception collaborative au sein d'un projet industriel est effectuée (notamment au sein du bureau d'études de Décathlon). Un cahier des Charges Fonctionnel est établi pour un système informatique d'aide à la conception coopérative.</p>	A
2000	Ahmed LEMLIQUI	100%	<p>Méthode de choix d'un maître d'œuvre à partir d'un cahier des charges. Cas de la rénovation d'une turbine à combustion. Cas d'étude et validation de l'approche SPEC.</p>	A
	Sinene HAJSALEM	100%	<p>Méthode de choix optimal d'un concept de solution au regard du cahier des charges. Cas du produit thermoplongeur. Cas d'étude et validation de SPEC.</p>	A
2001	Hamdi ABDELBASSET	100%	<p>Modèles conceptuels d'évaluation de performances acoustiques (Voir aussi chapitre 5.6 en page 116)</p>	B
	Vincent ARQUIER	100%	<p>Développement d'une méthodologie de choix de nouveaux matériaux de remplacement dans l'ameublement par une mise en œuvre de la méthode SPEC.</p>	A

Tableau 7 : Détail des sujets de DEA encadrés

3.3 Description des sujets de recherche

3.3.1L'axe « représentation et raisonnements fonctionnels »

N°	Sujet et réf.	Description
(1)	<p>Modèle fonctionnel du besoin en allocation spatiale</p> <p>[1, 3, 23, 25, 26]</p> <p>[Medjdoub 1996]</p> <p>Annexe 7.6.1</p> <p>Fiche de thèse 2</p> <p>Sujet (10) pour la <i>méthode de synthèse des solutions topologiques</i></p>	<p>Dans l'approche Archiplan développée au cours de la thèse de Medjdoub, il est proposé un modèle fonctionnel du besoin en <i>allocation spatiale</i> sous la forme d'un <i>diagramme fonctionnel</i> (voir Figure 10). Ce diagramme fonctionnel consiste en une représentation graphique des pièces (d'un logement familial, d'une école, d'une unité de production...) sur un ou plusieurs étages avec des contraintes unaires (bornes sur les aires et les deux dimensions minimales et maximales) et des contraintes binaires entre pièces.</p> <p>Une grande richesse de contraintes fonctionnelles binaires a été proposée, notamment la <i>contrainte d'adjacence généralisée</i> qui permet d'exprimer à la fois l'intervalle dans lequel se situe la distance entre deux pièces et l'intervalle sur lequel les pièces sont autorisées à être en vis-à-vis. Ce <i>diagramme fonctionnel</i> se traduit en une superposition de contraintes de <i>cohérence par arcs</i> (technique de <i>programmation par contraintes</i>).</p> <p>Une définition mathématique a été donnée d'une <i>solution de placement topologique</i> (voir Figure 11), qui correspond totalement à un <i>concept de solution</i>. Il a été constaté que cette <i>solution topologique</i> correspondait bien aux <i>esquisses</i> que les architectes ou implanteurs réalisaient à la prise en compte du cahier des charges et juste avant une représentation en CAO paramétrée. Notre approche semble proposer un pont en préconception.</p>
		 <p>Figure 11 : Une solution topologique (concept) dans Archiplan</p>

<p>(2) Nouveaux outils d'Analyse de la Valeur</p>	<p>Il s'agit ici d'une réflexion essentiellement personnelle sur des indicateurs de performances et de valeurs qui permettraient de déboucher sur du pilotage de projet et des actions de reconception de produit.</p>
<p>[34, 35]</p>	<p>Ces travaux ont déjà mené à proposer deux outils d'analyse de la valeur. Nous avons remarqué que l'Analyse de la Valeur nous a habitués :</p> <ul style="list-style-type: none"> - d'une part à comparer l'histogramme des <i>coûts</i> et celui de <i>l'importance</i> des fonctions en phase 3 d'une action AV « Analyse des fonctions et des coûts ». Cette comparaison est utilisée pour identifier des gaspillages et piloter la reconception d'un produit. - d'autre part à prendre en compte simultanément <i>l'importance</i> des fonctions et leur <i>satisfaction</i> pour comparer plusieurs solutions en phase 5 d'une action AV « Choix de solution ». <p>Pourquoi ne jamais comparer la satisfaction d'une fonction à son coût ? Nous avons souligné l'arbitraire ou tout au moins le danger de ces deux premières comparaisons et nous proposons une définition de la <i>valeur d'une fonction</i> (relativement à une solution) basée sur le triptyque : <i>satisfaction-importance-coût</i>. Les deux nouveaux outils d'AV qui en découlent traduisent le compromis devant exister entre les trois attributs d'une fonction : son importance et son coût et sa satisfaction relativement à une solution.</p> <p>L'outil <i>d'Evaluation des Valeurs de fonctions</i> remplace l'outil de <i>Comparaison des histogrammes des coûts et importances</i>. Par une construction graphique, il est possible de visualiser immédiatement les fonctions à reconcevoir dans un ordre de priorité. Une notion de <i>valeur relative</i> de fonction est également utilisée.</p> <p>L'outil de <i>Tableau de choix des solutions</i> est basé sur une nouvelle formule permettant le calcul de la <i>Valeur globale</i> du produit à partir des <i>Valeurs de ses fonctions</i>.</p> <p>Ces deux propositions méthodologiques restent tout de même perfectibles.</p>

<p>Modèle fonctionnel de représentation des objectifs d'un projet d'entreprise [11], [Paillès 1999]</p>	<p>Un modèle fonctionnel des objectifs d'un projet d'entreprise est proposé sous la forme d'un graphe hiérarchique. Au niveau le plus haut, on retrouve un objectif stratégique de l'entreprise. Au niveau le plus bas, on retrouve un ensemble d'actions de changement possibles relativement à un projet antérieur du même type. Par la suite et au niveau du cas d'étude, nous avons surtout caractérisé des actions de changement allant dans le sens d'une augmentation de la (des) flexibilité (s). Chaque niveau du graphe fonctionnel correspond à un découpage structurel de l'entreprise (service, département) gérant ses objectifs et ses critères d'appréciation (performances) spécifiques. Deux modèles se greffent sur ce modèle d'objectifs (voir Figure 12). Un modèle d'évaluation d'investissements et de performances permet de traduire un investissement sur une action en performances de cette action, et de traduire les performances de cette action en performances de l'objectif de plus haut niveau. Ces « traductions » se basent sur des modèles paramétriques et donc sur une capitalisation des projets antérieurs (seuls les projets routiniers sont donc concernés). Un deuxième modèle de satisfaction a été développé qui exprime l'insatisfaction du responsable d'un service comme une combinaison de sa propre insatisfaction vis-à-vis des performances de ses propres objectifs et de l'insatisfaction de son supérieur hiérarchique (insatisfaction récursive). Le réglage de cette combinaison permettra alors de caractériser les managements de type directif ou de type plus participatif. Ces modèles permettent une évaluation prédictive des performances d'un nouveau projet et la détermination optimale des investissements, voire (11).</p>
<p>Fiche de thèse 4</p> <p>Sujet (11) pour méthode de prédiction d'investissements</p>	<p>Légende:</p> <ul style="list-style-type: none"> Loi de performance (flèche bleue) Loi d'investissement sur les ressources (flèche bleue) Loi d'insatisfaction personnelle (flèche rouge) Loi d'insatisfaction générale (flèche verte) <p>1 Investissement sur actions de flexibilité</p> <p>2 Evaluation des performances d'une stratégie de flexibilité</p> <p>3 Management (probation des insatisfactions)</p> <p>4 Amélioration des investissements de la stratégie de flexibilité</p> <p>Niveau 1: Action 1, Action 2, Action n</p> <p>Niveau 2: F₁₁, F₂₁, F₃₁</p> <p>Niveau 3: F_{2p}, F_{3q}</p> <p>Niveau 4: Niveau 1, Niveau 2, Niveau 3, Niveau 4</p>

Figure 12 : Les modèles d'évaluation d'investissements et de performances et de satisfaction au dessus du modèle d'objectifs de ODISAI

<p>(4) Modèle « SPEC de représentation des objectifs d'un produit/projet »</p>	<p>La méthode SPEC, comme <i>Suivi des Performances en cours de Conception</i>, permet d'effectuer un suivi de l'adéquation des concepts de solution envisagés dans la phase de préconception par rapport au cahier des charges du produit/projet. Le mécanisme d'adéquation, de génération des indicateurs de satisfaction et de risque, ainsi que les fonctionnalités de reconception sont détaillés dans le sujet (14).</p>
<p>[16, 31, 32, 33]</p>	<p>La méthode SPEC est basée sur une <i>modélisation et un enrichissement important du Cahier des Charges fonctionnel</i> d'un produit/projet relativement aux préconisations des normes. Cet enrichissement est nécessaire pour pouvoir reconcevoir ou choisir entre concepts de produits/projets de manière moins triviale qu'avec les outils de l'Analyse de la Valeur ou du QFD. SPEC s'appuie sur une représentation classique pour les praticiens de l'AV : arborescence fonctionnelle et fonctions de service feuilles caractérisées par des critères. La satisfaction désirée relativement à un critère ne se traduit plus par un niveau objectif quantifié mais par une <i>courbe d'utilité</i> (voir Figure 13.a). Un <i>modèle de satisfaction</i> est inclus dans notre CdCF, qui va permettre de déterminer la part de satisfaction atteinte au niveau de chaque fonction pour un concept de solution donné. Ce modèle a deux aspects remarquables : il intègre parfaitement les <i>incertitudes</i> propres au jugement en phase de préconception, et il ne <i>présuppose pas de linéarité</i> dans la contribution des fonctions filles à la satisfaction de leur mère. Ces deux aspects sont mis en oeuvre par :</p>
<p>Annexe 7.6.5</p>	<p>- dans le cas d'une linéarité, l'utilisation de <i>poids entachés d'incertitude</i> (modélisation par une distribution de probabilité). Ceux-ci peuvent être issus d'un processus de décision du groupe de travail par l'intermédiaire du <i>Tri Croisé de Monte-Carlo (TCMC)</i>, méthode originale présentée dans le sujet (17).</p> <p>- la modélisation d'une non-linéarité par des <i>règles qualitatives</i> très proches du langage naturel et similaires aux <i>bases de règles floues</i> de la logique floue,</p> <p>- des <i>seuils d'acceptation</i> pour exprimer les zones d'inadmissibilité dans la satisfaction d'une fonction, c'est-à-dire non négociables et réhibitoires pour le projet.</p>
<p>Fiche de thèse 5</p>	<p>Enfin, le <i>modèle des objectifs</i> s'accompagne du <i>modèle des performances fonctionnelles des concepts de solution</i>. A tout moment du processus de préconception, ces performances sont modélisées par des <i>courbes de distribution de probabilité</i> (voir Figure 13.b).</p>
<p>Sujet (14) pour fonctionnalités de SPEC</p>	<p>mis en oeuvre par :</p> <ul style="list-style-type: none"> - dans le cas d'une linéarité, l'utilisation de <i>poids entachés d'incertitude</i> (modélisation par une distribution de probabilité). Ceux-ci peuvent être issus d'un processus de décision du groupe de travail par l'intermédiaire du <i>Tri Croisé de Monte-Carlo (TCMC)</i>, méthode originale présentée dans le sujet (17). - la modélisation d'une non-linéarité par des <i>règles qualitatives</i> très proches du langage naturel et similaires aux <i>bases de règles floues</i> de la logique floue, - des <i>seuils d'acceptation</i> pour exprimer les zones d'inadmissibilité dans la satisfaction d'une fonction, c'est-à-dire non négociables et réhibitoires pour le projet.
<p>Sujet (17) pour TCMC</p>	<p>Enfin, le <i>modèle des objectifs</i> s'accompagne du <i>modèle des performances fonctionnelles des concepts de solution</i>. A tout moment du processus de préconception, ces performances sont modélisées par des <i>courbes de distribution de probabilité</i> (voir Figure 13.b).</p>

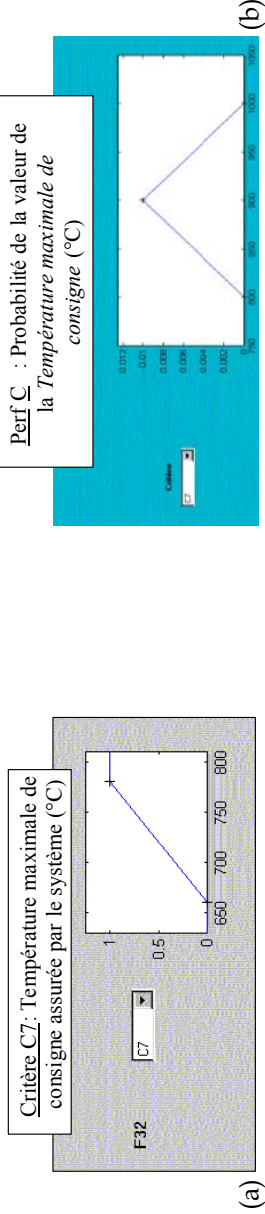


Figure 13 : Exemple de la modélisation dans SPEC d'un critère d'appréciation en (a) et d'une performance de solution correspondante en (b). L'approche SPEC est une approche générique d'aide à la préconception que nous considérons majeure pour notre futur travail de recherche puisqu'un nouveau sujet de thèse démarre (**chapitres 5.2 et 5.3**, page 113) et que notre propre travail de recherche en « *prototypage virtuel de concept* » se fonde en partie dessus (voir **chapitre 5.7 Prototypage virtuel de concept** en page 121).

3.3.2 L'axe « Raisonnements sur des modèles incomplets »

N°	Sujet et réf.	Description
(5)	<p>Méthode de conception qualitative de systèmes dynamiques QDES [4, 10, 28, 29, 40]</p> <p>Annexe 7.5.2, pages 13-23</p> <p>Fiche de thèse 1</p>	<p>Notre travail de thèse s'insérerait déjà dans le schéma de la <i>préconception</i> tel que défini en Figure 1. En effet, il s'agissait de développer une <i>méthode d'aide à la préconception d'un modèle comportemental de système physique</i>. On voulait trouver un système d'équations algébro-différentielles, ou une forme qualitative de ce système (<i>concept</i>), de manière à « coller au mieux » à des <i>spécifications comportementales</i> définies de manière également qualitative, c'est-à-dire en faisant abstraction des valeurs numériques mais non des formes des courbes comportementales et de leur évolution relative. La méthode développée n'est pas une méthode de synthèse mais d'analyse d'un concept (de système d'équations), puis de mesure d'adéquation avec les spécifications (points 3 et 4 de la Figure 1). Il s'agit d'un mapping besoin/faisabilité tel que défini au chapitre 2.3.4.5 de la page 50. Des opérateurs notamment d'intersection ont été développés entre <i>comportements potentiels</i> du concept et <i>comportements désirés</i> des spécifications (voir Figure 14). La méthode a donné des résultats dans différents domaines (mécanique, biologie, génie des procédés...).</p> <p>Spécifications comportementales qualitatives</p> <p>Contraintes d'ordre partiel entre temps caractéristiques</p> $\begin{cases} T_1 < T_3 \\ T_2 < T_3 \\ T_1 > T_2 \end{cases}$ <p>Concept de modèle de système physique = système d'équations algébro-différentielles qualitatives</p>

Figure 14 : QDES : la fonctionnalité majeure d'intersection des spécif. comportementales qualitatives et du concept de système physique

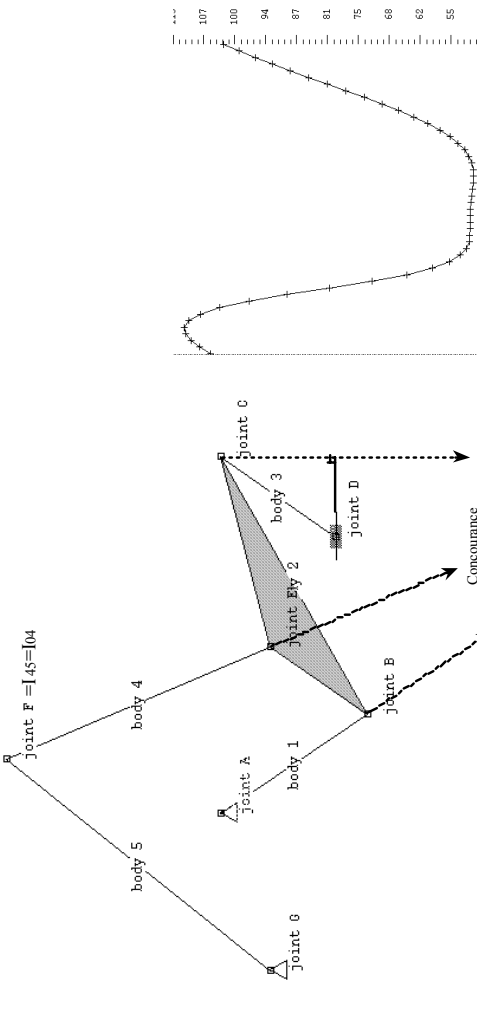
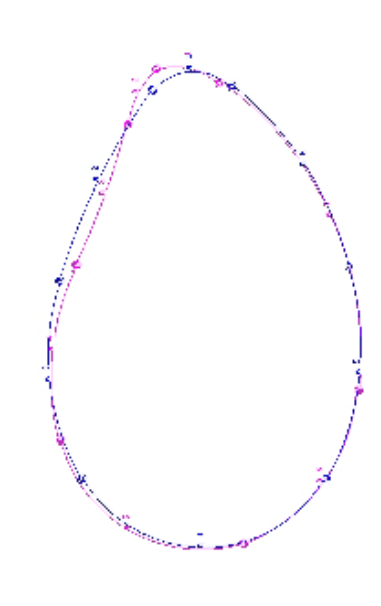
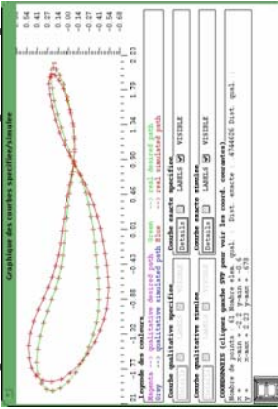
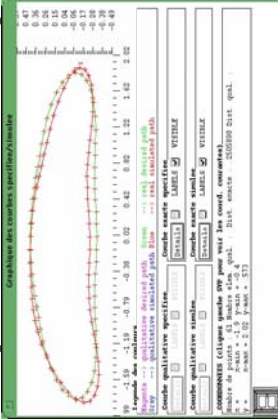
(6)	<p>Méthode de simulation cinématique et d'optimisation qualitative de mécanismes plans [10, 27, 39]</p> <p>Annexe 7.5.2. en version courte en français, pages 10-12</p> <p>Annexe 7.6.4. en version longue en anglais</p>	<p>Il s'agit d'un travail personnel mené après notre thèse.</p> <p>Notre but était ici d'aborder le problème ouvert de la <i>synthèse conjointe morphologique et dimensionnelle</i> des mécanismes plans. A cette fin, nous avons développé une plate-forme de conception de mécanismes articulés (réalisés avec des liaisons pivots et glissières), basée sur une <i>cinématique qualitative</i>. Notre <i>cinématique qualitative</i> s'appuie sur des considérations de <i>Centres Instantanés de Rotation</i>, des considérations de courbure, ainsi que sur une <i>décomposition modulaire du mécanisme en groupes d'Assur</i>. Une simulation cinématique qualitative génère directement des <i>trajectoires qualitatives</i> sous la forme d'une liste d'arcs de cercle et de segments de droite. Cela revient à propager des morceaux de trajectoire circulaires le long du mécanisme, en partant du (des) moteur(s) jusqu'au point effecteur. Cette propagation permet de générer des <i>explications qualitatives</i> sur le fonctionnement du mécanisme, qui sont indépendantes de valeurs particulières de dimensions (voir Figure 15). Cette fonctionnalité est déterminante pour aborder le problème de la <i>synthèse</i>. De plus, nous avons montré que, pour le problème de la génération de trajectoire, une <i>optimisation dimensionnelle</i> du mécanisme basée sur une cinématique qualitative donne des résultats de qualité (voir Figure 16) est compétitive par rapport à une optimisation basée sur une simulation classique.</p>
	 <p>(a) Diagram of a mechanism with joints A, B, C, D and bodies 1, 2, 3, 4, 5. Joint F is labeled as $F = [45=104]$. A shaded area is labeled 'Joint Ely 2'. A dashed line is labeled 'Concurrence au point: 102'.</p> <p>(b) Graph showing the qualitative trajectory of a point. The y-axis is labeled 'Concurrence au point: 102'. The x-axis has values: 35, 72, 108, 144, 180, 216, 252, 288, 324, 360. The curve shows a sharp peak around x=108.</p>	 <p>Figure 16: Qualité de l'optimisation dimensionnelle d'un mécanisme à partir de notre modèle de cinématique qualitative</p>

Figure 15 : Notre modèle de cinématique qualitative est capable de générer des explications sur le phénomène de palier d'immobilité (b) sous la forme de propriétés symboliques (a) vérifiées par les paramètres dimensionnels

(7)	<p>Méthode de synthèse dimensionnelle de mécanismes plans par réseau de neurones</p> <p>[2, 9, 24, 37]</p> <p>Annexe 7.6.2</p> <p>[Vasiliiu 1997]</p> <p>Fiche de thèse 3</p>	<p>Nous sommes peut-être parmi les premiers⁴⁶ à avoir proposé une <i>méthode de synthèse dimensionnelle de mécanismes plans générateurs de trajectoires</i>⁴⁷ par Réseau de Neurones Artificiel (RNA). Nous l'avons appliquée avec succès au classique mécanisme 4-barres et démontré son application à tout mécanisme plan. Nous nous sommes restreints ici au cas d'une <i>trajectoire spécifiée avec indépendance du temps</i> (un point du mécanisme parcourt la trajectoire sans prescription de vitesse).</p> <p>Il n'existe pas de méthode idéale même sur un cas aussi simple lorsque la trajectoire spécifiée n'est pas exactement une sextique (voir chapitre 2.3.3.2 en page 43). La plupart des méthodes <i>graphiques</i> et <i>analytiques</i> de synthèse exigent de spécifier la trajectoire désirée d'une manière souvent non fonctionnelle : par une liste de points de la trajectoire plutôt que par une forme, entraînant des conséquences néfastes sur la qualité du résultat. Quand aux méthodes <i>d'optimisation dimensionnelle</i>, elles sont relativement lentes et leur convergence dépend de la solution initiale.</p> <p>La difficulté majeure à résoudre était qu'un RNA a obligatoirement un nombre constant de neurones d'entrée et de sortie qui sont des variables continues (réels entre 0 et 1). Par conséquent, toute trajectoire désirée, quelque soit sa complexité, devait pouvoir être codée sur un nombre fixe de neurones d'entrée. Nous avons eu l'idée d'utiliser la décomposition d'une trajectoire en séries de Fourier selon le modèle de MacGarva [McGarva 1994; McGarva et al 1993] ; les 22 coefficients complexes des 5 premières harmoniques se sont avérés suffisants pour approximer suffisamment correctement des trajectoires avec un point de rebroussement. De plus, cette méthode a permis de s'abstraire de l'arbitraire du choix d'un nombre de points descriptifs de la trajectoire pour mieux caractériser la forme de la courbe.</p> <p>Une autre difficulté a résidé à avoir le moins de neurones de sortie. L'observation de la propriété d'invariance du couple trajectoire/mécanisme par rapport à des transformations affines a amené à économiser 5 paramètres, amenant à 17 neurones d'entrée et 5 neurones de sortie (codant les dimensions du 4-barres) après une opération de normalisation (deux couches de 22 neurones résident entre l'entrée et la sortie).</p> <p>Un total de 30000 mécanismes ont été générés et simulés pour assurer l'apprentissage du RNA, 15000 ont été nécessaires comme jeu de données de test. Les résultats sont très satisfaisants d'un point de vue qualité (voir Figure 17), la synthèse est immédiate. Un RNA tient sur 100 octets, laissant espérer la présence sur une simple disquette informatique d'une multitude de morphologies de mécanismes.</p>
<div style="display: flex; justify-content: space-around;">   </div>		
<p>Figure 17 : Réalisme : Deux exemples de superposition de trajectoires spécifiées et de trajectoires générées par les mécanismes synthétisés</p>		

⁴⁶ à prendre au conditionnel mais en partie confirmé au colloque NATO [24]

⁴⁷ La fonction d'un tel mécanisme est qu'un point lié à une de ses pièces parcourt une trajectoire désirée.

Méthode de synthèse topologique et dimensionnelle de mécanismes plans par raisonnement basé sur des cas qualitatifs

[Vasiliu 1997]

Fiche de thèse 3

Sujet (6) pour le modèle de cinématique qualitative

Une méthode de *synthèse topologique et dimensionnelle* de mécanismes plans générateurs de trajectoire par *raisonnement basé sur les cas* (case-based reasoning) a été développée. Comme le montre la **Figure 19**, une trajectoire est ici représentée par un *index* de longueur variable issu de l'abstraction qualitative d'une trajectoire sous forme d'un ensemble d'arcs de cercle et de segments (modèle déjà présent dans [27, 39], voir sujet (6)). Cet *index* est comparé à ceux des cas (*index + structure*) présents dans la base (voir **Figure 18**). Une métrique de proximité des *index* qualitatifs a été proposée. En réalité, l'abstraction d'une trajectoire spécifiée génère plusieurs *index* (i.e. séries d'arcs de cercle et segments) selon l'approximation faite et le mécanisme de recherche des *index* proches s'avère complexe. La base de cas est volumineuse (environ 30 Mo de données pour le mécanisme 4-barres). Néanmoins, la synthèse donne des résultats étonnants et d'une grande souplesse d'utilisation. En effet, ce type de synthèse ne privilégie pas la précision numérique de la trajectoire, ni la forme comme en (7) mais l'allure qualitative (courbes petites, moyennes ou grandes, points d'inflexion).

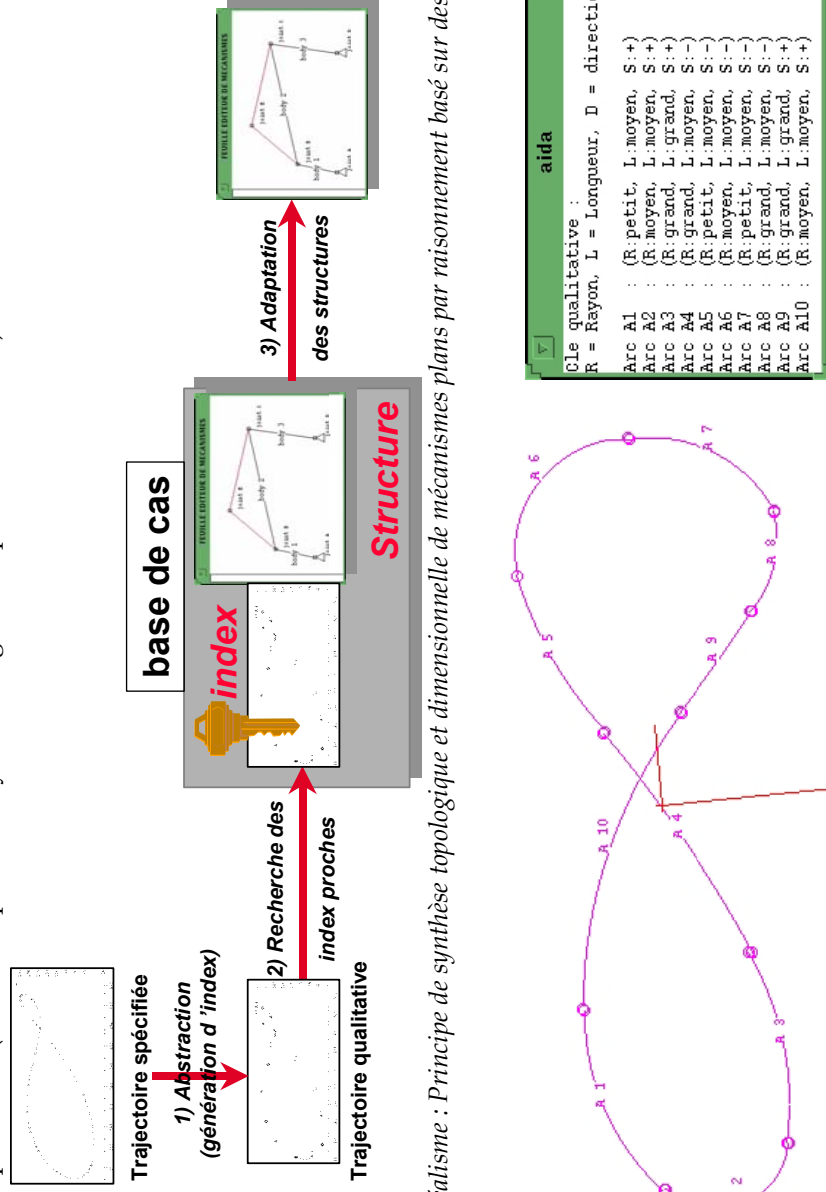


Figure 18 : Réalisme : Principe de synthèse topologique et dimensionnelle de mécanismes plans par raisonnement basé sur des cas qualitatifs

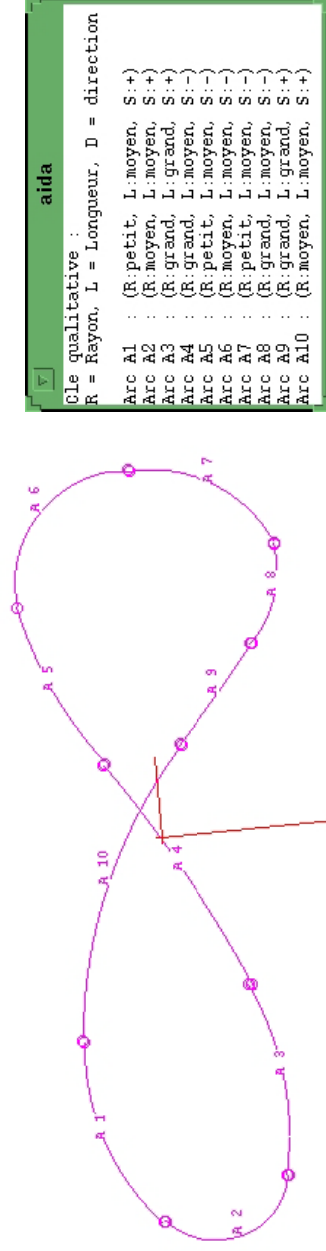


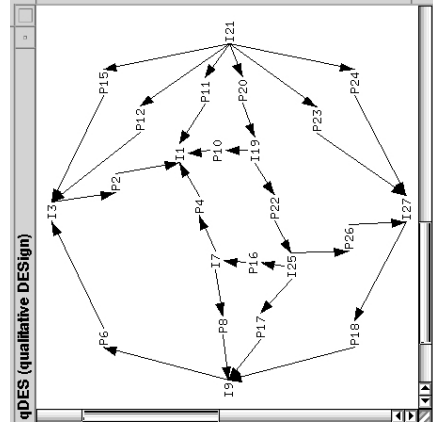
Figure 19 : Index d'une trajectoire qualitative

Méthode de représentation graphique planaire d'un graphe

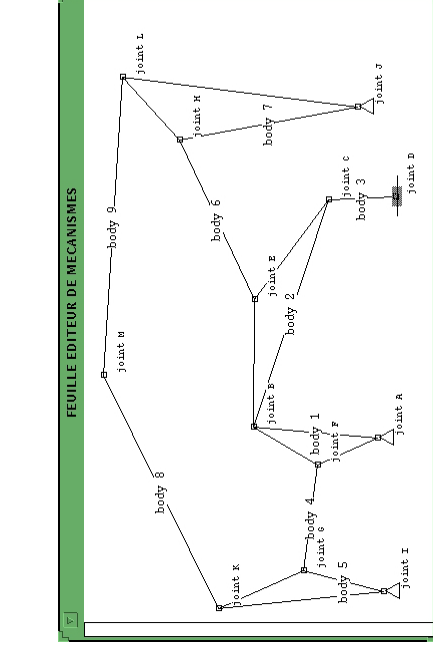
[Vasiliiu 1993; Vasiliiu 1997]

(9)

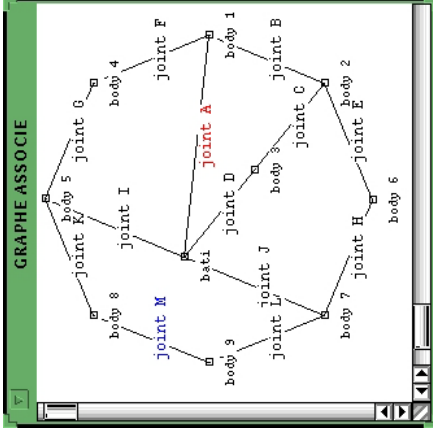
Lors de l'encadrement du DEA d'Adrian Vasiliiu, nous avons développé un nouvel *algorithme de représentation planaire ou de dépliage de structures de données de type graphe*. Nous l'avons baptisé TGU (*Topological Graph Unfolding*). Cet algorithme est très rapide, il peut prendre en compte n'importe quelle structure de graphe (même non dépliable) pour minimiser le nombre d'entrecroisement d'arêtes. L'algorithme original consiste en une optimisation par la méthode de *recherche tabou* (voir Bland et Dawson pour les principes [Bland et al 1991]) dans l'espace topologique des faces du graphe.



(a)



(b)



(c)

Figure 20 : Exemples de dépliage de graphes avec l'algorithme TGU : (a) Exemple extrait de la thèse de Yannou [40], (b) et (c) Représentation cinématique d'un mécanisme à barres et de son graphe topologique (composants-connections) extraite de la thèse de Vasiliiu [Vasiliiu 1997]

Cet algorithme TGU a d'abord servi à représenter des concepts de solution lors de notre thèse [40] (voir Figure 20.a) puis des topologies de mécanismes lors de la thèse de Vasiliiu [Vasiliiu 1997] (voir Figure 20.b).

Méthode de synthèse de solutions topologiques de placement

[1, 3, 23, 25, 26]

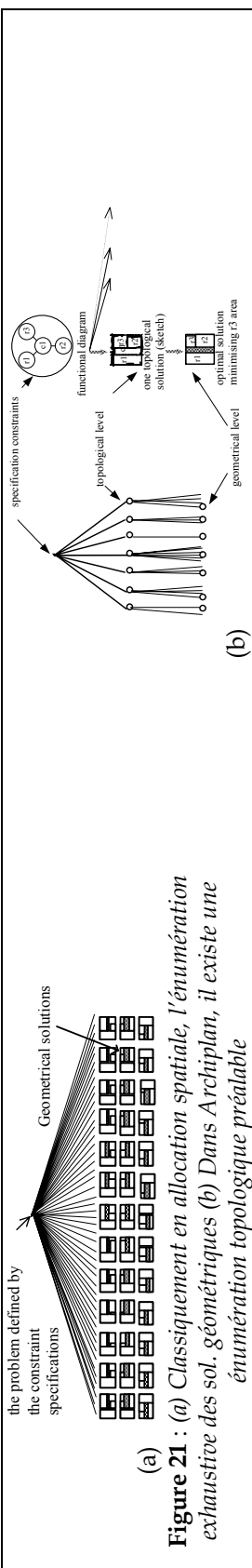


Figure 21 : (a) *Classiquement en allocation spatiale, l'énumération exhaustive des sol. géométriques (b) Dans Archiplan, il existe une énumération topologique préalable*

(10)

	<p>[Medjdoub 1996]</p> <p>Annexe 7.6.1</p> <p>Fiche de thèse 2</p> <p>Sujet (1) pour le modèle fonctionnel en allocation spatiale</p>	<p>Le problème traité ici est celui du dimensionnement et du placement optimal de locaux sur une surface donnée ou <i>allocation spatiale</i>, de type logements familiaux, bureaux ou équipements collectifs... L'objectif était de développer une méthode de synthèse de solutions de placement qui parte de l'expression fonctionnelle du besoin en termes de contraintes sur les locaux et qui aboutisse à des solutions de placement satisfaisant les contraintes. Le problème, vieux de 20 ans, donnait lieu jusqu'alors à des méthodes d'énumération exhaustive (Figure 21.a) dans un temps rédhibitoire⁴⁸ (ex : programmation par contraintes [Aggoun et al 1992; Charman 1995; Du Verdier 1993]) ou à des méthodes d'optimisation sous-optimales souvent basées sur des heuristiques (ex : systèmes experts [André 1986; Flemming 1988], algorithmes génétiques [Gero et al 1998]). En ce qui concerne les méthodes de synthèse basées sur une première énumération de concepts (ex : utilisation de grammaires de formes [Knight 1988] ou énumérations basées sur des graphes [Schwarz et al 1994]), il n'est pas possible d'éliminer des topologies qui sont en apparence en accord avec le cahier des charges mais qui n'ont en réalité aucune solution géométrique (non consistance). Notre méthode évite tous ces problèmes.</p> <p>Son originalité est de proposer un modèle de placement à trois niveaux : fonctionnel, topologique et géométrique (Figure 21.b). Basée sur une définition originale d'une <i>solution topologique de placement</i>, et sur une méthode de synthèse originale de ces solutions (voir spécifiquement [1]), méthode dite de dso (<i>dynamic space ordering</i>), la première énumération concerne toutes les solutions topologiquement différentes, sans présumer pour autant de dimensions finales précises. Ces solutions topologiques, en faible nombre, sont appréhendables graphiquement par un concepteur qui peut ensuite « naviguer » dans cet espace (Figure 22). Cette approche, qui combine la programmation orientée objet et les techniques de programmation par contraintes, a ainsi l'avantage d'éviter le problème récurrent de l'explosion combinatoire. Pour chaque solution topologique, la meilleure solution dimensionnelle est trouvée au regard de critères de coûts, de surfaces utiles, de trame ou autres (critère de minimisation de surface de couloirs en Figure 22).</p> <p>Figure 22 : Les collecteurs des sol. topologiques et des meilleures sol. géométriques correspondantes</p>
--	--	--

⁴⁸ Deux solutions de placement se différenciant par une légère translation de cloison pouvaient être considérées comme des solutions différentes, des millions de solutions pouvaient être ainsi énumérées.

Méthode d'aide à l'évaluation prédictive des performances d'un projet récurrent et optimale des investissements

[11], [Pailles 1999]
Fiche de thèse 4
Sujet (3) pour le modèle des objectifs de projets d'entreprise

Une méthode d'aide à l'évaluation prédictive des performances d'un projet récurrent et à la détermination optimale des investissements a été proposée (thèse de Pailles). Comme cette méthode s'appuie sur un modèle fonctionnel incluant, au plus bas niveau, des actions de changement allant dans le sens de plus de flexibilité (voir sujet (3)), nous pouvons dire que notre méthode est également une méthode d'évaluation d'une stratégie optimale de flexibilité.

Notre méthode effectuée à la fois une optimisation et une simulation.

La phase d'optimisation (programmation linéaire) consiste à maximiser la satisfaction ou la valeur (satisfaction/coût) de plus haut niveau (voir Figure 23), à enveloppe budgétaire donnée, en ignorant donc la satisfaction ou l'insatisfaction que chaque responsable peut avoir à son niveau vis-à-vis de ses propres objectifs. Le modèle de satisfaction est donc inopérant ; cela traduit un *management de type directif idéal* où tout le monde agit dans le sens des seuls objectifs de plus haut niveau qu'il est sensé connaître.

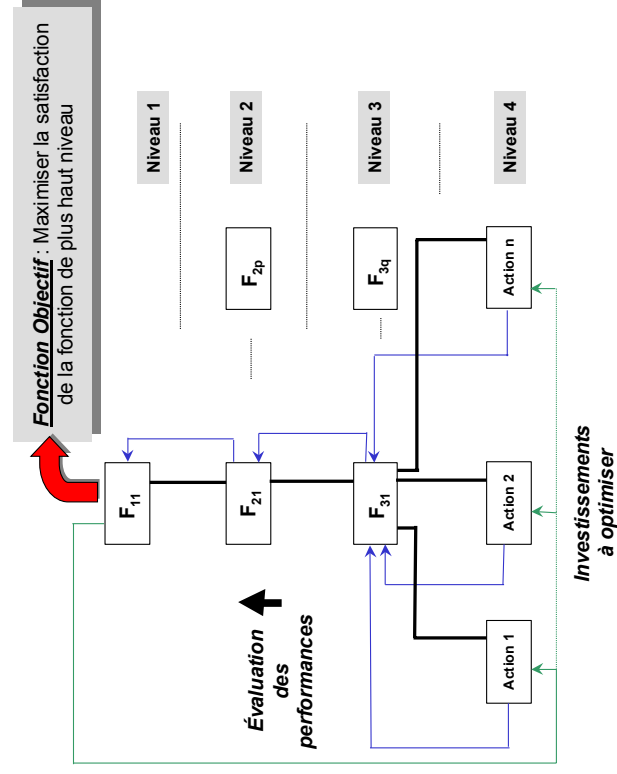


Figure 23 : La méthode d'optimisation d'ODISAI

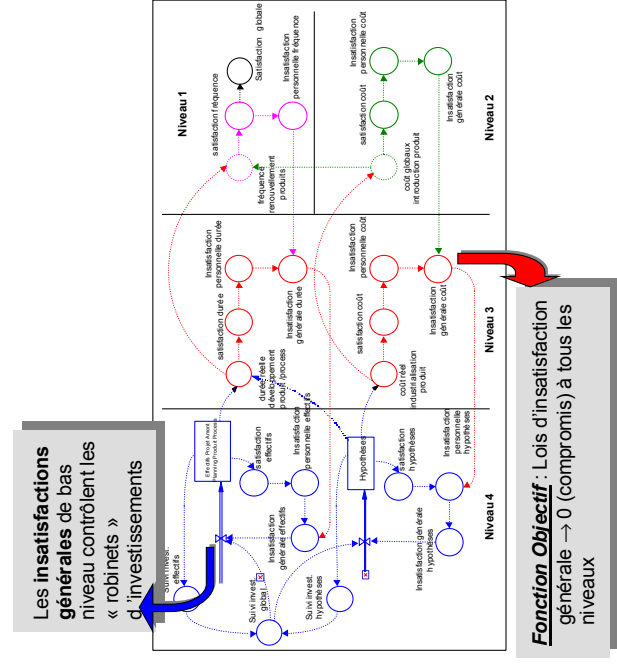


Figure 24 : La méthode de simulation d'ODISAI

...suite

La phase de *simulation* va, quand à elle, tenir compte des compromis à tout niveau, chacun essayant d'atteindre ses propres objectifs et de favoriser en partie les objectifs de son responsable. En ce sens, l'optimisation traduit un *management de type participatif* qui est variable et peut aller du *management anarchique* (chacun regarde seulement ses propres objectifs) au *management directif*. Le réglage se fait avec un seul paramètre (dit « poids du chef ») traduisant à tout niveau le compromis effectué entre les insatisfactions personnelles d'un responsable et celles de son responsable.

La simulation est basée sur un modèle de *dynamique des systèmes* (voir **Figure 24**). Une simulation consiste, pour une enveloppe budgétaire donnée, à réguler les investissements dans les actions (robinets sur la **Figure 24**) de manière à atteindre des « compromis d'insatisfactions » à tout niveau. Une fois la stabilité de simulation atteinte, les performances finales optimales (pour cette enveloppe budgétaire) sont données pour tout niveau, et notamment pour le niveau le plus haut. En réitérant des simulations à enveloppe budgétaire différente, on obtient un résultat majeur qui est la courbe de satisfaction (ou valeur) globale en fonction de l'investissement. Cette courbe donnée en **Figure 25**, se décline en fonction du type de management :

- les actions de flexibilité à rendre prioritaires en fonction de l'enveloppe budgétaire disponible,
- en corrolaire, l'évolution de la part d'investissement sur une action de flexibilité à enveloppe budgétaire variable (voir **Figure 26**), on peut alors juger de la robustesse d'une préconisation de flexibilité,
- la sensibilité des actions de flexibilité par rapport aux modifications d'objectifs stratégiques (de haut niveau).

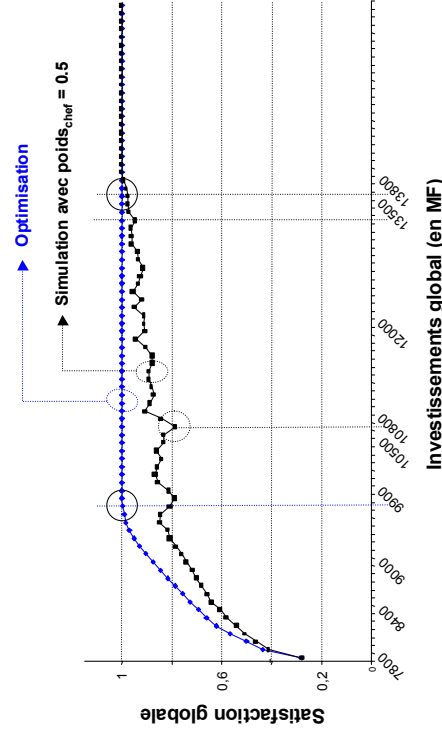


Figure 25 : Courbe de satisfaction du projet dans ODISAI

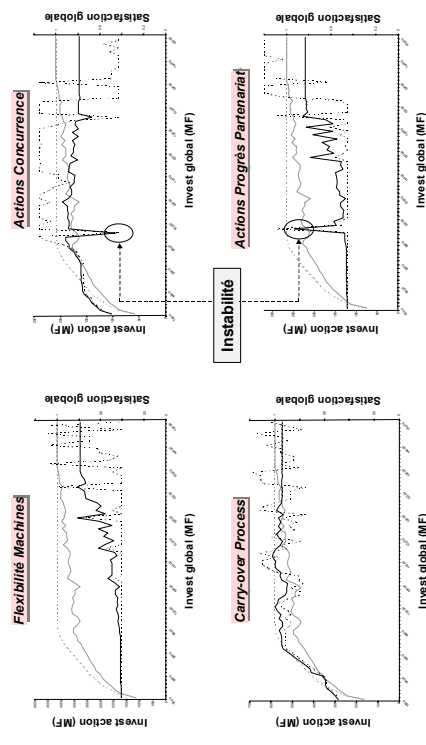


Figure 26 : Courbe d'investissement dans une action de flexibilité dans ODISAI

(12)	Typologie des méthodes de synthèse des systèmes physiques	<p>Il s'agit d'un thème de réflexion continu. Nous avons établi dans [9] une première typologie des approches de conception d'un système mécanique devant répondre à une fonction comportementale désirée autour de la dialectique analyse/synthèse. Or, à l'heure actuelle, la grande majorité des logiciels de conception de systèmes mécaniques n'effectuent qu'une analyse, à charge pour le concepteur de modifier avec beaucoup d'intuition la morphologie ou les dimensions de son système, puis de relancer une autre analyse pour constater les effets. Les raisons du manque des méthodes de synthèse proviennent de leur grande complexité de mise en œuvre dépendant de la nature de la connaissance reliant fonctions et structures, et du même coup de l'absence de généralité de ces méthodes. La typologie que nous avons proposée, basée sur la</p>
------	--	--

[9]

Annexe 7.5.1

reliant fonctions et structures, et du même coup de l'absence de généralité de ces méthodes. La typologie que nous avons proposée, basée sur la nature de cette connaissance, aboutit à cinq grandes catégories d'approches :

- **La conception incrémentale par analyses successives.** Par constataions des différences notables entre le résultat de l'analyse et la fonction désirée, un logiciel de conception devrait conseiller autant que possible des pistes de reconception, en indiquant aussi bien des modifications morphologiques que des modifications dimensionnelles. C'est rarement le cas.

- **La synthèse morphologique.** En mécanique, elle mène à une explosion combinatoire car elle est peu contrainte par la fonction désirée, étant donné que les dimensions y contribuent (à la fonction) aussi fortement.

- **La synthèse morphologique et dimensionnelle par composition de briques fonctionnelles.** C'est l'idéal puisqu'on synthétise ici directement une ou des structures (morphologies et dimensions) satisfaisantes. Hélas, elle ne s'applique en mécanique que dans des cas très particuliers, ceux qui vérifient les principes de brique fonctionnelle et du « *no function in structure* ». Dans la pratique, elle s'applique à des familles de mécanismes ayant des fonctions comportementales particulières. D'autre part, il faut lever le problème de l'explosion combinatoire dans l'agencement des briques entre elles.

- **La synthèse à partir d'une compilation de la connaissance.** L'idée est de capitaliser des cas de conception éventuellement générés par simulation. Le gain espéré lors d'une requête dans une base de cas est la certitude d'une réponse (tout au moins d'un cas proche) et la rapidité. On distingue trois sous-familles de méthodes :

- **Le raisonnement par énumération et adaptation des cas les plus proches.** C'est le domaine du *case-based reasoning*. La base de cas restitue une liste de cas proches classés par ordre de proximité avec l'index d'entrée. La métrique, la longueur de la liste de cas résultats et la procédure d'adaptation des cas sont des procédures explicites, paramétrables par le concepteur. D'autres avantages sont la rapidité et le fait de stocker dans la même base plusieurs morphologies de systèmes mécaniques, ce qui revient, dans une certaine mesure, à effectuer une *synthèse morphologique et dimensionnelle* à la fois. L'inconvénient est la taille de la base.

- **Le raisonnement par interpolation des cas proches.** Si l'on se place dans le cas d'un réseau neuronal, cette interpolation des cas proches a des chances de donner un meilleur résultat que le plus proche des cas. A l'inverse, l'interpolation peut être néfaste à cause de la non inversibilité de la fonction mathématique reliant les structures aux fonctions comportementales. On ne sait pas interpoler entre des morphologies et on n'effectue ici qu'une *synthèse dimensionnelle* pour une morphologie donnée. Le grand avantage de l'approche par réseau de neurones est la très petite taille de la base de cas. Un bouclage rapide sur la synthèse dimensionnelle de plusieurs morphologies émule en quelque sorte une synthèse morphologique.

- **La synthèse dimensionnelle par optimisation, et en particulier par bouclage sur des simulations.** Elle fonctionne assez bien et commence à être utilisée dans les logiciels de conception du commerce. Néanmoins, elle est lente, elle est limitée à un faible nombre de variables d'optimisation et la convergence n'est pas assurée. Elle vient souvent peaufiner les dimensions d'un concept issu d'une synthèse.

Conclusion : Il n'y a pas de solution miracle, il faut choisir une famille d'approche adaptée au problème.

(13) **Contribution a la synthèse dimensionnelle de mécanismes par coopération entre agents artificiels et concepteurs humains**

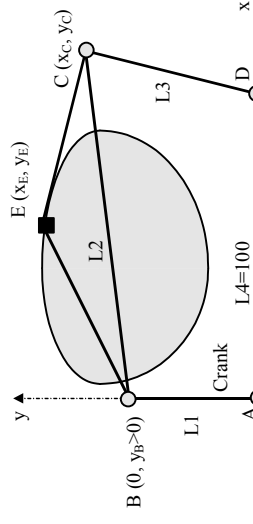
[6, 18, 21], [Damay 1999]

Annexe 7.6.3

Sujet 18

Cette approche de synthèse de mécanisme plan par collaboration d'agents artificiels et humains est propre à l'équipe de Patrick Chedmail du laboratoire Irccyn de l'Ecole Centrale de Nantes, nous y avons simplement contribué.

Dans ce travail sont mises en évidence des configurations de couplage entre agents (voir Figure 27), pour réaliser une synthèse dimensionnelle optimale d'un mécanisme 4 barres. A l'instar d'un problème classique de conception, celui-ci échoue souvent dans des minima locaux associés aux neuf variables qui le caractérisent. Une distribution de l'étude permet une coopération entre agents (réactifs comme des optimiseurs ou des agents de contrainte, ou cognitifs comme le concepteur) travaillant à différents buts, avec des critères différents.



$$X_{sh} = (y_B, x_C, y_C, x_E, y_E), X_{po} = (x_A, y_A, \alpha, z, s)$$

Agent \ global variables	Xsh						Xpo		
	X _B	X _C	Y _C	X _E	Y _E	X _A	Y _A	alpha	zoom
Designer	x	x	x	x	x	x	x	x	x
simulated designer						x	x	x	x
Optimiser	x	x	x	x	x	x	x	x	x
"Grashov agent"	x	x	x						
Singularity	x	x	x						
Bounding Boxes						x	x		x
Symmetry		x	x	x	x	x	x	x	

(a) Paramétrage du mécanisme 4-barres (b) Répartition de l'action des agents sur une partie des paramètres

(14)	<p>Méthode SPEC de Suivi de Performances en cours de Conception</p>	<p>SPEC est une approche de suivi des performances de solutions/concepts en phase de préconception. SPEC est basée sur l'hypothèse que, pour des concepts innovants, seule l'expérience des concepteurs est à même de proposer une estimation des performances fonctionnelles. SPEC fournit donc les moyens de l'exprimer. De même le fait d'investir dans l'établissement d'une logique de satisfaction entre toutes les parties prenantes est tout sauf une perte de temps car c'est ce modèle qui justement, après étude de sensibilités, est à même de donner les meilleurs indicateurs de reconception/optimisation du concept et du CdC. Le modèle de satisfaction de SPEC ainsi que les estimations de performances de concept sont établis par divers acteurs de la conception et la pertinence de SPEC se révèle dans la maîtrise globale, le chiffrage et les nuances de l'adéquation des attendus et des potentialités des concepts.</p>
	<p>[16, 31, 32, 33]</p>	<p>Après une modélisation d'un CdCF enrichi et celle des performances probables des concepts de solution (voir Figure 28), une simulation de Monté-Carlo permet de donner des résultats à trois niveaux :</p>
	<p>Annexe 7.6.5</p>	<ul style="list-style-type: none"> - au plus haut niveau de l'arbre fonctionnel, on a un indicateur donnant le pourcentage de <i>risque d'échec</i>, de <i>réussite conditionnelle</i> et de <i>réussite</i> du projet (voir Figure 29).
	<p>Fiche de thèse 5</p>	<ul style="list-style-type: none"> - On peut ensuite consulter la <i>probabilité de satisfaction du produit/projet</i> dans son ensemble,
	<p>Sujet (4) pour modèle de SPEC</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Enfin, lorsque nous désirons visualiser la satisfaction ou les risques relativement à une fonction de l'arbre fonctionnel, il suffit de se déplacer graphiquement dans l'arbre fonctionnel pour obtenir le résultat escompté (voir Figure 30). On peut ainsi quantifier les avantages et les inconvénients de chaque solution et faire une comparaison de type multi-critères de manière à essayer de développer une nouvelle solution ayant les avantages de chacune. Un autre résultat de taille est de visualiser les <i>chemins critiques d'échec du projet</i>. En effet, il est très utile de connaître le poids relatif de chacune des performances incriminées dans un échec.
	<p>Sujet (17) pour TCMC</p>	<p>SPEC est utilisé en cours de projet comme un simulateur de scénarios d'amélioration de concepts de manière à :</p> <ul style="list-style-type: none"> - revoir l'expression <i>fonctionnelle du besoin</i>, en relaxant certaines exigences sur les critères qui ont une grande influence sur la réussite du projet, et en rajoutant d'autres éléments du besoin induits par le contexte du projet, - demander au bureau d'étude des réductions d'incertitude sur la connaissance de certaines performances lorsque ces réductions influent beaucoup sur l'indicateur de réussite/échec du projet, - demander au bureau d'étude/maitre d'œuvre des améliorations de certaines performances lorsque ces améliorations influent beaucoup sur l'indicateur de réussite/échec du projet. <p>Pour ce faire, on utilise alors une <i>analyse de sensibilité des performances</i> (en jouant sur l'amélioration et la réduction d'incertitude) par rapport à l'amélioration d'indicateurs portant sur le projet en entier ou sur telle fonction particulière de l'arbre fonctionnel.</p>
		<p>SPEC a été testé industriellement sur deux cas d'étude différents lors de stages de DEA (voir les stages de Lemlioui et Hajsalem dans le Tableau 7).</p>

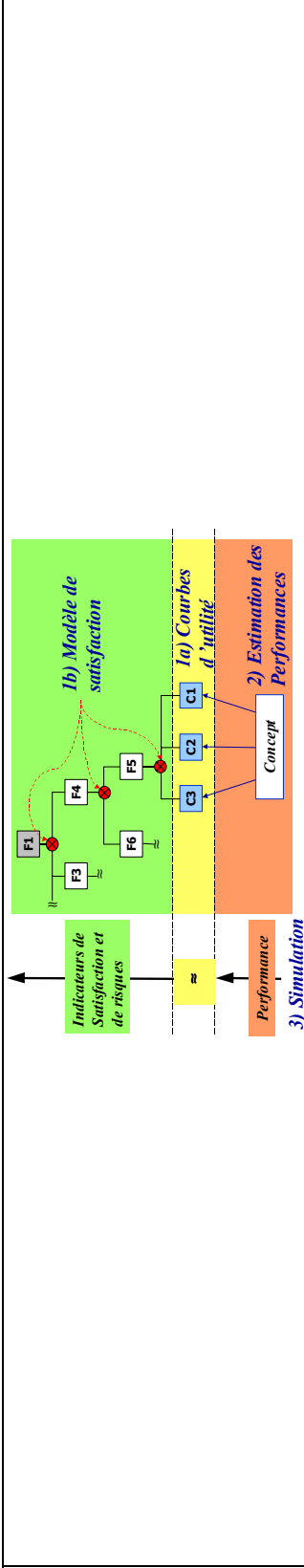


Figure 28 : Les trois phases d'utilisation de SPEC 1) Modélisation du CdCF enrichi 2) Estimation des performances de concepts 3) Simulations

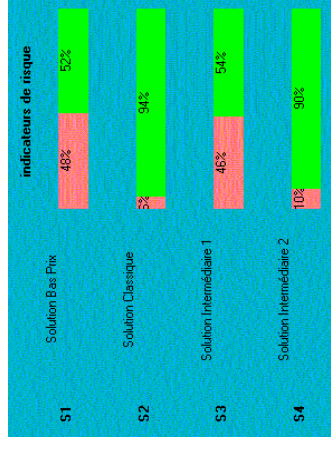


Figure 29 : SPEC : comparaison des indicateurs de réussite du projet entre 4 concepts de solution

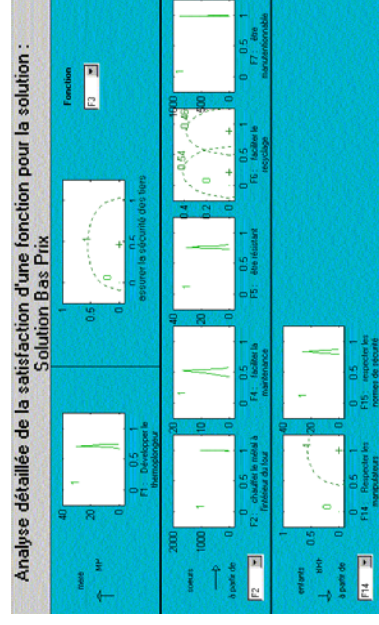
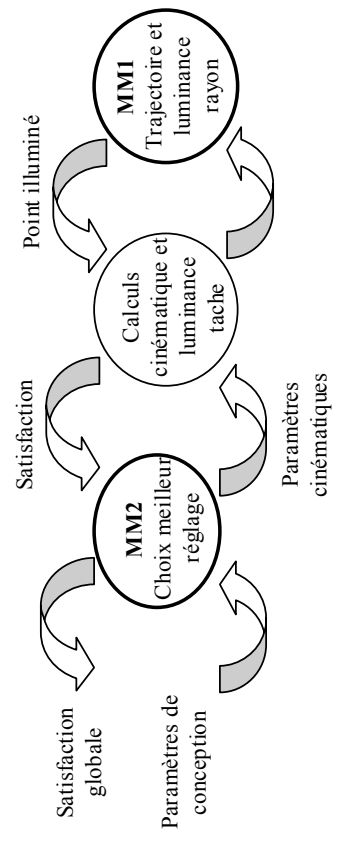
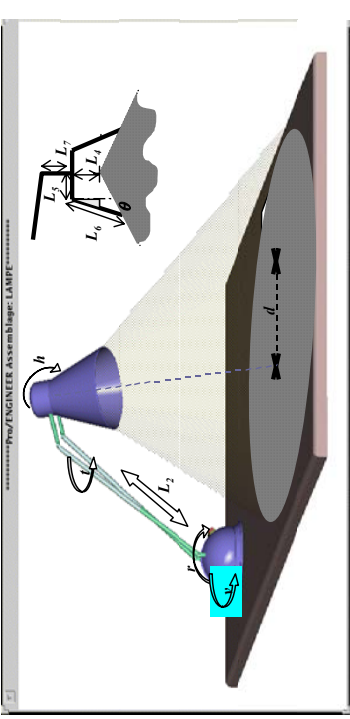


Figure 30 : SPEC : La table de bord des risques et des probabilités de satisfaction pour toutes les fonctions de l'arbre fonctionnel

(15)	<p>Recherche d'un cadre de prototypage virtuel de concept</p>	<p>Dans [5, 20], nous avons envisagé un système d'optimisation de concept qui allait des paramètres de conception flous aux performances et des performances à une satisfaction globale par l'intermédiaire d'un modèle de satisfaction (qui deviendra SPEC).</p> <p>Puis nous avons entamé une collaboration avec le Professeur Russel Barton, durant son année sabbatique en France en 1999-2000, qui s'est concrétisée par deux publications [12, 19]. Ce travail sera poursuivi par notre collaboration prochaine aux Etats-Unis (voir chapitre 5.7 Prototypage virtuel de concept en page 121).</p>
<p>Annexe 7.6.7</p> <p>Chapitre 5.7</p>	<p>Ces deux publications ont consisté à travailler sur l'optimisation d'un concept de lampe de bureau. Ce concept est défini par une cinématique donnée en Figure 32. Cette lampe est « virtuellement posée » sur un bureau et peut se déplacer et être réglée jusqu'à des valeurs butées. Les valeurs de réglage sont appelées <i>paramètres cinématiques</i> (exemple : extension, twist et inclinaison des tiges, les 2 rotations du réflecteur...). Les valeurs butées (exemple : extension maximale des tiges, angles mini. et maxi...) ainsi que les dimensions fixes de la lampe (exemple : longueur et ouverture du réflecteur) sont appelées <i>paramètres de conception</i>.</p> <p>Dans [19], nous expliquons que le but de la conception de la lampe est de trouver les meilleurs paramètres de conception qui maximisent la qualité de l'éclairage. Un petit modèle SPEC de satisfaction globale est proposé sous la forme d'une combinaison floue de 3 performances fonctionnelles : la valeur moyenne de la luminance de la tâche lumineuse sur la table, son écart type et la distance entre le centre de la tâche et le centre d'une feuille de papier. Un modèle cinématique a été établi ainsi qu'un modèle de trajectoire de rayon lumineux et de calcul de tache de luminance par bouclage sur plusieurs calculs de rayon. En réalité, pour un jeu de paramètres de conception, il nous faut d'abord trouver le meilleur réglage cinématique de la lampe qui maximise la qualité de l'éclairage. C'est ce que traduit la Figure 31 avec ses 3 boucles. Dans [12] nous avons modélisé le métamodèle MM1 du calcul de la trajectoire et de la luminance d'un rayon lumineux. Ce problème faisait intervenir un problème épineux, celui de la métamodélisation d'une fonction présentant des discontinuités qui sont ici dues à la réflexion du rayon ou pas sur le réflecteur avant l'impact sur la table. Trois stratégies de métamodélisations ont été étudiées (Figure 34 à Figure 36) selon qu'on établit un métamodèle global (le moins bon en Figure 34) ou un métamodèle des modèles continus et de la logique de discontinuité (le plus rapide et de bonne qualité, voir Figure 36). Ce métamodèle MM1 a permis d'établir rapidement un métamodèle global MM2, dont nous sommes en train de dépeupler les résultats.</p>	 <p>Figure 31 : Principe d'optimisation de la lampe de bureau</p>
		 <p>Figure 32 : Cinématique de la lampe de bureau</p>

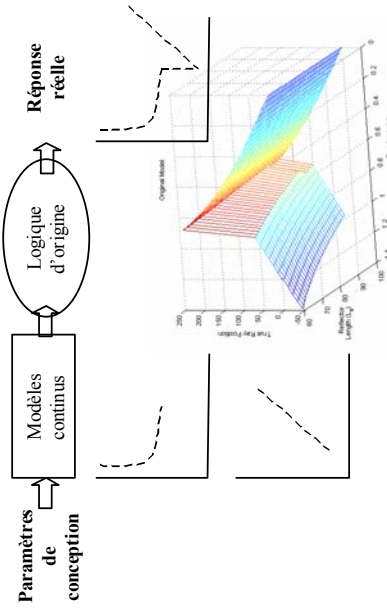


Figure 33 : Modèle d'origine

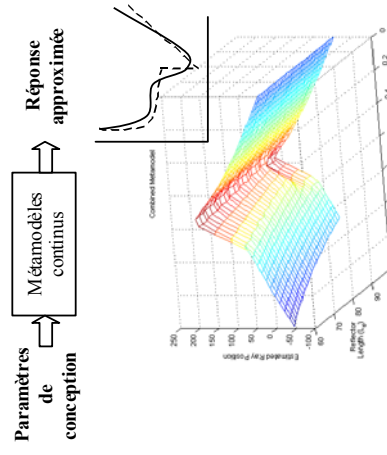


Figure 34 : Métamodèle global

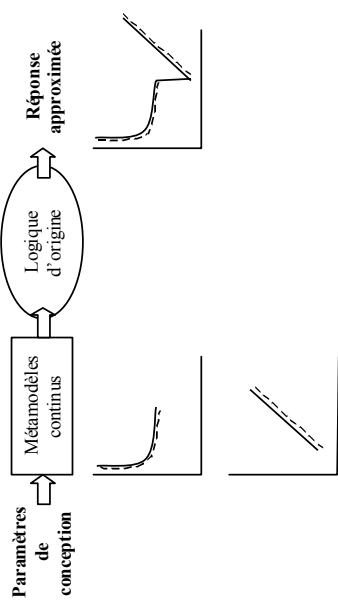


Figure 35 : Métamodèles continus et logique d'origine

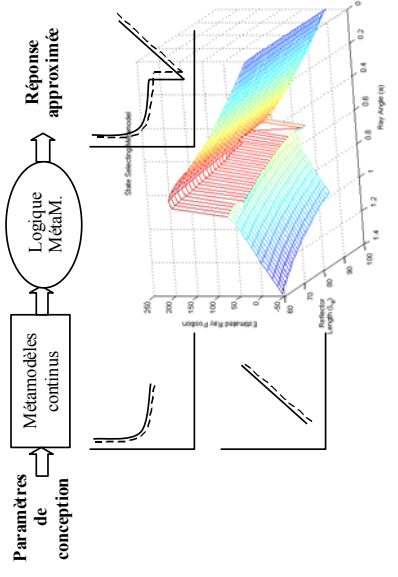


Figure 36 : Métamodèles continus et métamodèle de la logique

(16)	<p>Réflexion sur l'optimisation de produits à fonction d'évaluation mal définie</p>	<p>Il s'agit là d'un nouveau thème de réflexion sur l'optimisation de produits à fonction d'évaluation mal définie (<i>ill-defined problems</i>) et de ce fait il est plutôt décrit au chapitre 5.8, page 123.</p> <p>Ce travail a commencé par l'étude de la répartition optimale des lettres sur un clavier d'ordinateur avec l'<i>algorithme des colonies de fourmis</i>.</p>
------	--	--

3.3.3L'axe « conception collaborative en préconception »

Aide à la pondération en groupe : le Tri Croisé de Monté Carlo (TCMC)

[17, 30]

Annexe 7.6.6

Fiche de thèse 5

Pondérer, seul ou en groupe, un ensemble d'éléments est une activité très fréquente en génie industriel (objectifs et critères comme dans SPEC, probabilités, durées, coûts...). Que l'on décide d'effectuer cette pondération, seul ou en groupe pour bénéficier de multiples expertises, on se trouve rapidement dans l'embarras lorsqu'il s'agit de distribuer 100% entre un nombre important d'éléments (la difficulté commence déjà à 3 ou 4). Les méthodes dites de *tri croisé* interviennent alors pour simplifier le processus en proposant de décomposer le problème en plusieurs comparaisons binaires d'éléments. Or, la version la plus répandue du *tri croisé*, décrite dans la plupart des manuels d'Analyse de la Valeur, est une méthode *inexacte* car elle ne peut jamais aboutir à des pondérations fiables. Pourtant, il existe des approches exactes dans la littérature de l'aide à la décision multi-critères (voir **chapitre 2.3.4.3 L'évaluation multi-critère de solution** en page 47). Ces approches s'appliquent généralement à des classes de problème selon que 1) des comparaisons binaires peuvent être omises, 2) plusieurs décideurs peuvent proposer des comparaisons différentes 3) l'incertitude sur la valeur des comparaisons est modélisée.

Nous avons proposé une approche basée sur la simulation de Monté-Carlo qui généralise toute méthode de tri croisé déterministe (comparaisons sans incertitude) à la prise en compte d'une forme quelconque d'incertitude. Nous avons proposé des *indicateurs de cohérence* propre des jugements des décideurs mais aussi de cohérence d'ensemble. Ceux-ci permettent de pointer du doigt les faiblesses de jugement et les manques d'expertise, et de rentrer dans une boucle d'amélioration de la qualité du jugement.

Nous proposons alors un cadre d'aide à la pondération d'éléments, qui soit particulièrement adapté au travail de groupe, en mode asynchrone et réparti (au travers d'un réseau d'entreprise par exemple), et qui prenne en compte de nombreux protocoles de vote.

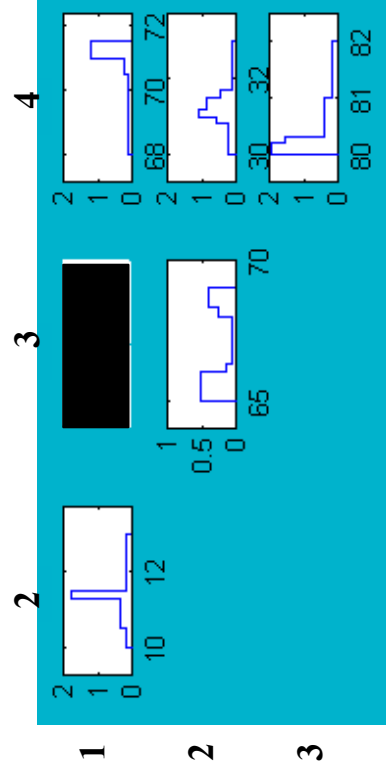


Figure 37 : Méthode TCMC : (a) Matrice des comparaisons binaires

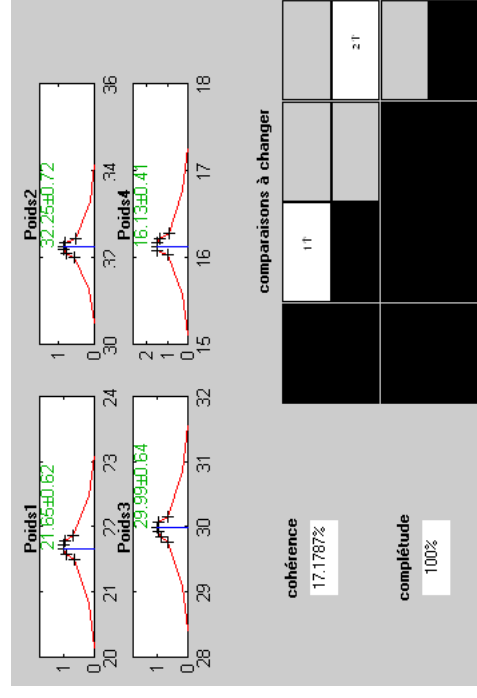


Figure 38 : (b) Résultats : poids entachés d'incertitude et voies d'amélioration de la cohérence

(18)	<p>Coopération entre agents artificiels et concepteurs humains [6, 18, 21], [Damay 1999] Annexe 7.6.3 Sujet (13)</p>	<p>Cette coopération d'agents artificiels et humains pour l'optimisation dimensionnelle d'un mécanisme 4-barres (pour suivre une trajectoire spécifiée) conduit à une convergence globale pour un jeu de priorités données. La solution choisie est de proposer une priorité fondée sur des bases de temps distinctes afin de conserver l'indépendance de chaque agent. Aucun agent superviseur n'est introduit. Les résultats montrent l'existence d'une plage de configurations pour la priorité des agents, pour laquelle une bonne convergence globale existe.</p> <p>Néanmoins, cette configuration n'est valable que pour une configuration initiale du mécanisme et pour une trajectoire spécifiée. La question n'est pas résolue de savoir s'il existe un réglage de priorités d'agents qui soit valable pour différentes configurations initiales du mécanisme et différentes trajectoires spécifiées. La généralisation à d'autres mécanismes est d'autant moins abordée.</p>
------	--	---

(19)	<p>La gestion de données techniques des processus d'industrialisation [13, 14, 15]</p>	<p>Ce travail se rapporte à la thèse de Bacha.</p> <p>Les <i>Systèmes d'Information Technique</i> (SIT) des bureaux des méthodes en entreprise ne cessent de proliférer, conséquence de la conception verticale des outils d'<i>Ingénierie de Process</i> (IPAO) et du morcellement du long processus d'industrialisation du produit. Pour pallier aux épineux problèmes causés par ce type d'organisation, les entreprises s'orientent naturellement vers la mise en place des <i>Systèmes de Gestion des Données Techniques</i> (SGDT). Cependant, de tels projets sont confrontés à des goulots d'étranglement qui s'expliquent par le fait que :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Les modèles d'expression du besoin sont incomplets et informels : les acteurs impliqués dans le projet (les maîtres d'œuvres et les maîtres d'ouvrages) ne communiquent pas facilement et leurs modèles n'appréhendent pas les évolutions permanentes des « <i>Business Requirements</i> » de l'entreprise. - Absence de démarche pour la conduite de projets des SIT : les approches théoriques dans le domaine, n'ont pas aidé les industriels à supprimer les ruptures et les retours arrière au niveau de jalons antérieurs du projet. De plus, la jeunesse inhérente au domaine de la GDT et des technologies de SGDT expliquent le manque d'expérience dans le déploiement de ces technologies en entreprise. <p>Ce travail au sein de Renault S.A. aboutit à deux principaux résultats :</p> <ul style="list-style-type: none"> - <i>Cahier des charges de la GDT Process</i> : il est formalisé avec des diagrammes de spécification standards et peut être décrit à l'aide des composants suivants : <ul style="list-style-type: none"> - <i>Nomenclatures</i> : basées sur les 4 entités : produit, process, ressource et système industriel. - <i>Cas d'utilisation métier</i> : traduisant les activités d'ingénierie de production par des liens entre les quatre entités. - <i>Caractéristiques de fabrication</i> : pour caractériser les composants spécifiques à une usine (exemples : répartition des surfaces d'implantation, maquette d'effectifs...) - <i>Spécifications liées à la GDT</i> : il s'agit de personnaliser et de gérer le cycle de vie des objets, les versions, les objets de types nomenclature, document ou modèle graphique en fonction des règles et des procédures métier de l'entreprise. - la <i>formalisation d'une démarche rationnelle assurant un continuum dans les jalons du projet</i>. Cette démarche intègre les approches descendante issue des principes systémiques et ascendante issue du paradigme objet.
------	---	---

4. Rayonnement scientifique

4.1 Groupes de recherche

Nous avons participé à trois groupes de recherche qui ont été déterminants dans notre montée en compétences dans ces domaines, dans notre connaissance des acteurs et des thématiques de recherche, ainsi que dans les collaborations et actions de diffusion scientifiques que nous avons effectuées. Ces trois groupes de recherche illustrent bien également trois aspects complémentaires de notre thème de recherche :

- l'aspect « raisonnement sur des modèles incomplets » avec le groupe de travail MQ&D (Modélisation Qualitative et Diagnostic),
- l'aspect préconception de produits et conception intégrée avec le groupement Priméca,
- les aspects fonctionnels, coûts et valeurs d'un produit, indicateurs de conception avec l'AFAV (Association Française pour l'Analyse de la Valeur).

4.1.1 Le groupe de recherche en raisonnement qualitatif

Notre sujet de thèse [40] s'est orienté très rapidement sur une thématique de l'Intelligence Artificielle appliquée aux sciences de l'ingénieur : la *Physique Qualitative*, qui était en émergence dans les années 1990.

Nous avons activement participé au groupe de travail français sur la Physique Qualitative entre 1992 et 1996, année de sa disparition. Ce groupe se dénommait : MQ&D pour *Modélisation Qualitative et Diagnostic*. Il fonctionnait au sein d'une double structure :

- un GDR-Automatique (Groupe de recherche financé par le CNRS)
- un Pôle de Recherches Commun en Intelligence Artificielle : PRC-IA

Ce groupe a fonctionné de manière très dynamique pendant 6 ans ; ses principaux résultats sont :

- le regroupement d'une cinquantaine de chercheurs de disciplines très différentes (automatique, informatique, électronique, génie des procédés, conception de produits, géologie, médecine, agronomie...), à raison d'une réunion nationale tous les trimestres,
- la production d'une trentaine de thèses dans le domaine,
- la production de deux ouvrages communs effectuant un état de l'art sur la Physique Qualitative :
 - a) Un article de 73 pages dans la revue européenne d'Intelligence Artificielle *AI-COM: Artificial Intelligence Communications*, 1995. 8(3-4): 119-192.
 - b) Le seul ouvrage de référence en français aux éditions Hermès : *Le raisonnement qualitatif pour les sciences de l'ingénieur*, L. Travé-Massuyès, P. Dague, et F. Guerrin, Editeurs. 1997, Hermès: Paris.

- la représentation française dans le colloque annuel mondial de Physique Qualitative : *QR* ou *International Workshop on Qualitative Reasoning about Physical Systems*.
- enfin, la fédération avec les autres groupes de travaux européens qui a abouti en 1997 au réseau d'excellence européen MONET : « *The European Network of Excellence in Model-Based Systems and Qualitative Reasoning* » (voir le site <http://monet.aber.ac.uk>). Ce réseau a perpétué ce thème de recherche en France après la disparition de MQ&D.

Dans ce cadre, nous avons présenté des travaux au colloque annuel mondial de Physique Qualitative de 1993 et 1995 [27, 28]. A l'issue de notre thèse, étant considéré comme le chercheur français nous étant le plus intéressés à la simulation qualitative appliquée aux systèmes mécaniques (les deux spécialistes mondiaux sont le suisse Faltings et l'américain Joskowics, ce dernier étant dans notre jury de thèse) et à la conception de systèmes en physique qualitative, nous fûmes chargés de la rédaction de deux chapitres des ouvrages communs : 7 pages sur 73 dans [4] et 26 pages sur 500 dans [10].

Enfin, nous avons participé au lancement de MONET en représentant par l'intermédiaire de l'ECP un nœud du réseau.

4.1.2 Le groupement Priméca

Le groupement Priméca⁴⁹ (<http://ensgi.inpg.fr/PRIMECA/>) fondé en 1991, et regroupant plusieurs dizaines d'écoles d'ingénieurs et d'universités, a joué durant la dernière décennie un rôle majeur dans le renouveau de l'enseignement et surtout de la recherche française en conception intégrée et simultanée.

Faisant partie d'un des laboratoires fondateurs de Priméca, le laboratoire Productique-Logistique de l'ECP, nous fûmes naturellement amenés à participer aux manifestations majeures de Priméca :

- les colloques nationaux Priméca : en 1991, 1993, 1995, 1997 et 2001
- les colloques internationaux IDMME (*International Conference on Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering*) de 1996, 1998 et 2000,
- l'ouvrage pédagogique de Priméca : « *Conception de produits mécaniques : méthodes, modèles et outils*, sous la direction de M. Tollenaere, 1998, Hermes. » avec la rédaction de 3 chapitres totalisant 84 pages sur 550 [7, 8, 9].
- les 2 ouvrages de Kluwer Academic Publishers issus des sélections des meilleures contributions aux colloques internationaux IDMME de 96 et 98 [5, 6, 11].

4.1.3 L'Association Française pour l'Analyse de la Valeur

Nous intéressant d'un point de vue recherche aux approches fonctionnelle en conception de produit et aux notions de valeur et performance d'un produit, nous nous sommes naturellement rapprochés de l'AFAV (Association Française pour l'Analyse de la Valeur, <http://www.afav.asso.fr/>).

L'Association Française pour l'Analyse de la Valeur est dédiée à la promotion des méthodes et outils liés à l'Analyse de la Valeur : Management par la Valeur, Cahier des

⁴⁹ Pôle de Ressources Informatiques pour la MECAnique

charges fonctionnel, Analyse fonctionnelle, Conception à coût objectif, Conception à objectifs désignés.

Après avoir participé aux actions de la Commission Enseignement de l'AFAV, nous fûmes nommés administrateur de l'AFAV en 2000 et chargés de développer des activités de type recherche, l'AFAV se plaignant de ne rien voir venir en recherche en France. Ce constat n'est pas tout à fait exact puisque des travaux existent dans ces domaines mais les chercheurs qui mènent ces travaux ne s'identifient pas, pour la plupart d'entre eux, à un thème de recherche commun. Il n'y a pas de colloque scientifique renommé dans ce domaine et aucun nom relatif à cette discipline n'a émergé⁵⁰. L'AFAV a pensé qu'elle pouvait jouer un rôle de fédérateur et d'incitateur dans la recherche de cette discipline en France.

Nous avons donc mené trois actions dans ce sens.

Tout d'abord, nous avons créé en février 2000 une liste de diffusion nommée « VAFORE » (comme VAleur, FONction, REcherche)⁵¹, liste que nous animons depuis sa création. Cette liste comporte actuellement plus de 140 abonnés regroupant des chercheurs, des industriels et des membres de cabinets de conseil, à parts à peu près égales, dans les domaines du « fonctionnel » et de la « valorique ». Les membres sont pour la plupart francophones, mais on compte également des membres suisses, belges, canadiens et anglais. Une charte a été rédigée pour définir le thème de ces échanges (voire en **annexe 7.3**). Le mot d'ordre est de s'exprimer sur des thèmes de recherche, et non de simples témoignages d'application de méthodologies par exemple. Sous cette condition et avec ce mélange tant désiré (chercheurs, industriels, conseils) et cette multidisciplinarité des participants, les échanges sont très riches. D'autre part, le site web hébergeant cette liste de diffusion (voir **Figure 39**) permet des échanges d'articles, la centralisation de sites de revues scientifiques et de colloques, autant d'aspects permettant de sentir poindre une communauté d'intérêts.

⁵⁰ « ingénierie valeur » et « ingénierie des spécifications » traduit par « *Requirement Engineering* » commencent à apparaître en parallèle de « management par la valeur ».

⁵¹ Liste de diffusion VAFORE (Reseau francophone de REcherche sur les disciplines VALoriques et FONctionnelles). Pour s'abonner : mail vide à vafore-abonnement@egroups.fr, pour écrire au groupe vafore@egroups.fr, site Web : <http://www.egroups.fr/group/vafore>

Adresse <http://www.egroups.fr/group/vafore> Liens

eGroups Votre **tribu** dans un **email**

[Accueil](#) [Mes groupes](#) [Aide](#) [Créer un groupe](#)

Bienvenue [yannou@pl.ecp.fr](#) | [Mon profil](#) | [Quitter](#)

vafore Créé le 16 fév 2000

Recherche [Filtre Familial Actif](#)

Page principale
[S'abonner](#)
[Messages](#)
[En instance](#)
[Envoyer](#)
[Abonnés](#)
[En instance](#)
[Retour à l'expéditeur](#)
[Banni](#)
[Fichiers](#)
[Calendrier](#)
[Sondages](#)
[Liens](#)
[Base de données](#)
[Chat](#)
[Promouvoir](#)

[Paramètres](#)
[Activité](#)

Description
 Réseau francophone de REcherche sur les disciplines VALoriques et FONctionnelles

Archive des messages par mois :

	jan	fév	mar	avr	mai	jun	jul	aoû	sep	oct	nov	déc
2001	51	4	2									
2000		2	29	13	14	7	25	9	10	17	15	16

Abonnés : 141

Catégorie : [Top](#) : [Cultures Community](#) : [Friends](#)

Adresses :
 Envoyer un message : vafore@egroups.fr
 S'abonner : vafore-subscribe@egroups.fr
 Se désabonner : vafore-unsubscribe@egroups.fr
 Propriétaire de la liste : vafore-owner@egroups.fr

Options :
 Figure
 Adhé
 Non r
 Tous
 envo
 Lang
 Franç
 Archi
 abon
 Les fi
 mess:

Figure 39 : Le site Web de VAFORE sur egroups.fr

La deuxième action que nous avons menée est l'édition scientifique⁵² d'un numéro spécial de la Revue Française de Gestion Industrielle (RFGI) sur le thème du « Management par la Valeur ». Ce numéro est celui d'avril 2001 ; son sommaire est donné en **annexe 7.4**.

La troisième action vient de consister à organiser une « session recherche » lors du prochain colloque AFAV'2001 sur le thème « Valeur, Management et Innovation ».

Enfin, nous contribuons régulièrement à des articles dans la revue « La Valeur » de l'AFAV [34, 35, 36, 38], publications classées dans « Revues Nationales Autres » : RNA). Ces publications nous ont permis de connaître et de nous faire connaître du monde industriel tournant autour de l'AF, l'AV, le MV et la GdP⁵³.

⁵² Appel à publication, notamment parmi les abonnés de la liste Vafore, relecture des articles, sommaire et éditorial.

⁵³ Analyse Fonctionnelle, Analyse de la Valeur, Management par la Valeur, Gestion de Projet

4.2 Coopérations industrielles

Les coopérations industrielles que nous avons pu avoir ne se sont pas concrétisées par un nombre important de contrats pour deux raisons. D'une part, nous avons encadré quatre thèses qui avaient d'autres sources de financement (Medjdoub, Vasiliu et Paillès étaient sur des postes d'assistant ECP et Limayem dispose d'une bourse MESR). D'autre part, nous ne nécessitons que rarement une rétribution (autre que celle de l'étudiant) des industriels pour un stage de DEA. C'est pourquoi d'autres coopérations industrielles sont relatées dans le chapitre Valorisation de la recherche.

En ce qui concerne les contrats, nous pouvons citer :

- notre propre thèse avec Dassault Systèmes (1,3 MF),
- encadrement de thèse de Nathalie Paillès financée à ses débuts par Renault S.A.,
- encadrement de thèse de Rebiha Bacha financée par Renault S.A. (540 kF),
- encadrement des deux stages de DEA de Ahmed Lemlioui et Sinene Hajsalem en 2000 au centre de recherche EDF de Chatou (contrat de 53 kF),

4.3 Valorisation de la recherche

Quelque chose qui nous semble autant, voire plus important, que la recherche initiale de contrats est la valorisation des résultats de recherche qui devrait être une des finalités de la recherche appliquée. En tant que chercheur bénéficiant de financements du ministère de la recherche, nous nous sentons redevables de faire bénéficier l'industrie française d'avancées notables. Combien de thèses du domaine du génie industriel sont « restées dans des cartons » alors qu'elles auraient pu être concrétisées par des logiciels ayant des fonctionnalités inédites ? Nous pensons que la France est en train de prendre un tournant de ce point de vue en incitant les chercheurs français à valoriser leurs travaux, déposer des brevets et créer leurs entreprises, mais elle semble avoir du retard par rapport à d'autres pays industrialisés. Nous ne pensons pas qu'une valorisation à grande échelle sous la forme d'une « mise sur le marché » soit une perte de temps ou un « avilissement » du point de vue de la recherche. En effet, nous lui trouvons au moins deux vertus :

- Celle de prendre conscience de la réalité du terrain, de sa diversité (quelles sont les fonctionnalités concrètement utilisables dans des contextes différents), de ses acteurs. Une valorisation nourrit en quelques sortes une future recherche de problématiques concrètes qui remontent des utilisateurs.
- Celle de doter les chercheurs en retour d'un produit propre et épuré qui leur permette de continuer à travailler sur des bases propres. C'est le cas d'un logiciel redéveloppé de façon commerciale et dont le chercheur peut bénéficier pour en faire sa nouvelle plate-forme de recherche.

Nos actions iront donc de plus en plus dans ce sens. En voici des exemples :

- Nous avons vendu l'algorithme de dépliage de graphe TGU (voire sujet de recherche (9)) à la société ILOG (premier éditeur mondial de toolkits de développement basés sur l'intelligence artificielle, <http://www.ilog.fr>) en 1994. En 1997, Adrian Vasiliu a été recruté par la société ILOG pour redévelopper une nouvelle version de cet algorithme.

- Nous commercialisons en ce moment la méthode du *Tri Croisé de Monté-Carlo* issue des travaux de recherche de Frej Limayem [17, 30]. Pour cela, nous nous sommes associés avec la société informatique Mk-tools. Une copie d'écran de l'interface utilisateur de la future version commerciale du TCMC est donnée en **Figure 40**.

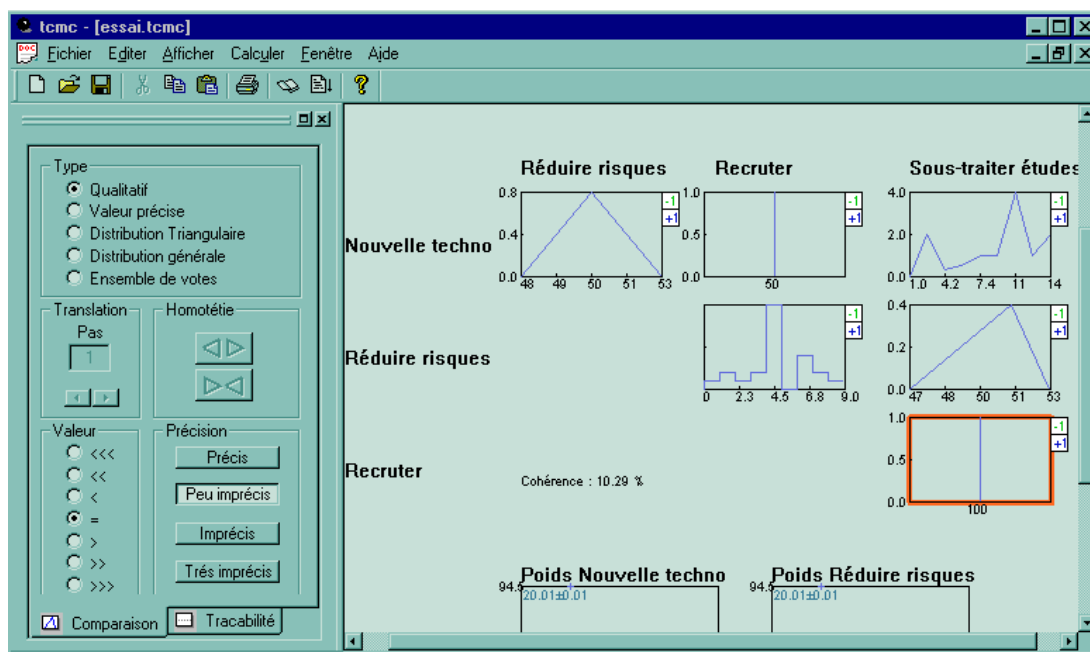


Figure 40 : Interface utilisateur du logiciel de Tri Croisé de Monté-Carlo dans sa version commerciale

- Nous avons le projet de commercialiser la méthode SPEC ([16, 31, 32, 33]). En effet, celle-ci séduit des industriels (EDF, France Telecom, RATP) et par conséquent intéresse les éditeurs de logiciels de ce domaine méthodologique. Nous avons déjà soumis, sans succès, un projet RNTL (*Réseau National de Technologies Logicielles*) en partenariat avec un éditeur de logiciels méthodologiques. A l'heure actuelle, nous étudions la possibilité qu'un autre éditeur puisse effectuer cette commercialisation en prenant à sa charge les frais de développement et de commercialisation.
- Suite à un projet en équipe d'étudiants centraliens sur 3 ans, nous avons déposé le brevet français n° 98-04588 le 10 avril 1998 ; il a été délivré le 23 juin 2000 (BOPI n° 00/25 sous le numéro de publication 2 777 222). Il concerne des innovations sur l'ergonomie de clavier d'ordinateur. Ce brevet protège plus particulièrement un principe de repose-paumes fonctionnels en cours de frappe, soulageant ainsi les épaules et le dos, ainsi qu'une utilisation du pouce plus importante, soulageant les autres doigts.
- Une demande d'extension internationale PCT n° 99-02510 a été effectuée le 14 octobre 1999, concernant également le clavier ergonomique (voir **Figure 41**).

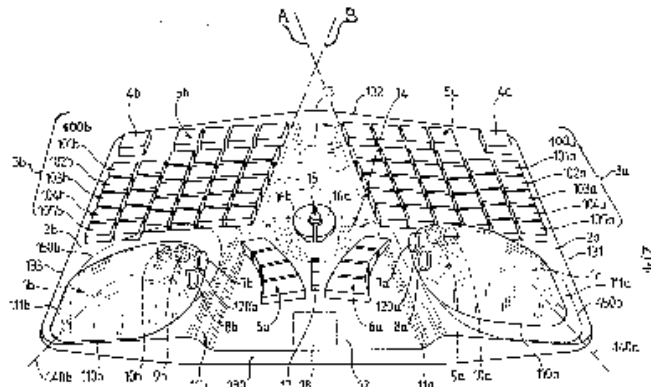
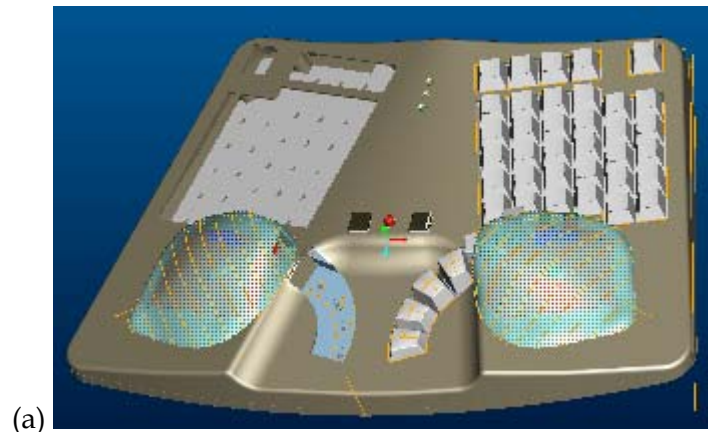


FIG. 2

(b)



Figure 41 : Le clavier ergonomique ECP (a) Modèle CAO, (b) Dessin du brevet PCT, (c) Prototype

4.4 Activités scientifiques administratives et organisationnelles

4.4.1 Relecture d'articles pour colloques et revues

- 2 articles pour QR'93 : *Seventh International Workshop on Qualitative Reasoning about Physical Systems*, Orcas Island, USA/WA, mai 1993,
- 2 articles pour QR'95 : *Ninth International Workshop on Qualitative Reasoning about Physical Systems*, Amsterdam, Pays-Bas, mai 1995,
- 2 articles pour ASDE'96 (Montpellier, 1996),
- articles pour les colloques Idmme de 1996, 1998, 2000 : *International Conference on Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering*.

- 8 articles pour le numéro spécial « Management par la Valeur » de la *Revue Française de Gestion Industrielle*, 2001/2,
- 2 autres articles pour la *Revue Française de Gestion Industrielle* en 2001,
- 1 article de *European Journal of Engineering Education* en 2001.
- 8 articles pour la publication des meilleurs articles de IDMME2000 dans un ouvrage de *Kluwer Academic Publishers*, en 2001.

4.4.2 Membre de jury de thèse

En dehors des propres thèses que nous avons encadrées, nous avons participé à deux jurys de thèse :

- Damay, T., Approche multi-agents en environnement virtuel pour la conception de produits. 1999, Thèse de l'Ecole Centrale de Nantes.
- Fauroux, J.-C., Conception optimale de structures cinématiques tridimensionnelles - Application aux mécanismes de transmission en rotation. 1999, Thèse de l'INSA de Toulouse.

4.4.3 Le DEA et le laboratoire PL

- Participation au montage du DEA de Génie des Systèmes Industriels, cohabilité en 1995 entre les Ecole Centrale Paris, EC Lyon et l'ENI de Saint-Etienne. Depuis, le DEA a été réhabilité en 2000 entre les Ecole Centrale Paris, EC Lyon et EC Lille.
- Responsable de l'option IPS (« Ingénierie de développement des Produits et des Systèmes ») du DEA (parmi 4)
- Participation au montage du laboratoire commun de Génie Industriel (courant 2000-2001) : Centrale-GI entre les écoles : EC Paris, EC Lille et EC Lyon. Cet ambitieux projet vise à regrouper 22 enseignants-chercheurs⁵⁴ autour d'une thématique de recherche clairement définie et d'objectifs d'enseignement communs (notamment autour du DEA de GSI commun, mais aussi au niveau de la formation continue). Un programme de recherche commun a été défini sous la forme de trois thématiques : 1) *Conception de produits, de systèmes et de services*, 2) *Management des connaissances et des savoir-faire*, 3) *Optimisation des systèmes industriels et logistiques*.
- Au sein de Centrale-GI, animateur de la thématique de recherche n°1 intitulée « *Conception de produits, de systèmes et de services* ».

4.5 Distinctions scientifiques

Nous avons été, en 1992, lauréats du « concours PrologIII » organisé par la société Prologia. Cela consistait à écrire un petit programme avec le langage Prolog III démontrant la puissance d'expressivité de la programmation par contraintes.

⁵⁴ Actuellement, 4 enseignants-chercheurs de l'Ecole Supérieure de Commerce de Lille font également partie de l'équipe pluridisciplinaire, l'EC Nantes étant actuellement quant à elle en position d'observatrice.

5. Orientations de notre recherche

5.1 Cadre général de l'évolution des recherches

Plus que jamais notre objectif de recherche est de développer des outils d'aide à la synthèse, au suivi et à la décision en avant-projet ou préconception de produits, domaine du *conceptual design*.

Le suivi ou la décision doivent prendre en compte les *incertitudes*, incertitudes qui peuvent se traduire par des *risques* concernant la mauvaise réalisation du *produit* final ou un dérapage concernant le *projet*. Ces incertitudes et risques portent sur les *performances* et les *coûts* du produit/projet relativement aux *spécifications* consignées dans un *cahier des charges* évolutif. Nous ne désirons pas pour l'instant nous intéresser trop précisément au domaine de la gestion de projet, c'est-à-dire à la façon de mettre en œuvre le cahier des charges au travers d'un projet pour aboutir au produit résultat. Nous sommes persuadés qu'il y a des outils génériques à développer sans encore se préoccuper de la planification des tâches. Une grande difficulté en préconception reste l'estimation des performances d'un concept de produit ; il s'agit là de la problématique de l'axe B de recherche et plus généralement d'une problématique de *prototypage virtuel* en *conceptual design*.

En conséquence, les premiers aspects cités se retrouvent bien dans l'axe A : *Représentation et raisonnements fonctionnels*, et la problématique sur l'évaluation de performances se retrouve bien dans l'axe B : *Raisonnements sur des modèles incomplets*.

Notre thème de recherche pourrait donc se résumer aux mots-clés suivants : (spécifications, cahier des charges, risques produits/projets, incertitudes, coûts, performances, valeurs, prototypage virtuel) ceci pour de l'aide au suivi et à la décision en avant-projet ou en préconception de produits, c'est-à-dire dans le domaine du *conceptual design* et des *design methodologies*.

Notre conviction est que l'on doit pousser l'aspect *générique* de ces outils (au niveau de leur indépendance avec des domaines de produits, de connaissances ou de problèmes) le plus loin possible. Par contre, il est nécessaire, de manière à définir cette généralité, d'alterner avec des travaux portant sur des problèmes *appliqués* :

- champs de connaissance particuliers comme les mécanismes, l'allocation spatiale et maintenant l'acoustique (voir plus loin),
- domaines de produits : production de masse de produits sophistiqués (automobile), production de masse de produits simples, production unique d'un produit complexe (centrale nucléaire), etc...

Dans les **Tableau 8** et **Tableau 9**, nous décrivons les 7 sujets de recherche principaux que nous avons planifiés à court et moyen termes.

Les 3 premiers d'entre eux s'appuient sur l'approche d'aide à la décision SPEC (a, b, c) dont nous croyons fondamentalement à l'intérêt industriel. Ils alternent les aspects génériques et les aspects appliqués (cas d'études prévus avec EDF, RATP et le Centre Technique du Bois et de l'Ameublement). Une réflexion personnelle à plus long terme a débuté sur la polysémie du terme valeur ; l'objectif est d'aboutir à des indicateurs de valeur opérationnels dans des méthodes d'aide à la préconception.

	Axe A Représentation et raisonnements fonctionnels	Générique/ Appliqué	Chercheur
(a)	Extension de SPEC à des modèles de coûts	Générique Appliqué sur cas d'étude RATP	Inclu dans le cahier des Charges de la thèse de Sinene HAJSALEM débutée en Septembre 2001
(b)	Extension de SPEC à des modèles de risques	Générique Appliqué sur cas d'étude EDF, industrie de l'ameublement	Inclu dans le cahier des Charges de la thèse de Sinene HAJSALEM débutée en Septembre 2001
(c)	Extension de SPEC à la gestion de projet	Générique	Candidat potentiel à la thèse actuellement en VSN dans un laboratoire de GI en Suède
(d)	Opérationnalisation de la valeur		Travail personnel

Tableau 8 : Les sujets de recherche actuels et futurs dans l'axe A

L'axe B est lui-même bien défini avec 3 sujets de recherche (voir **Tableau 9**). Le sujet (e) consiste à s'intéresser à un sujet ardu, de l'avis des experts du domaine : faire le tour des modèles conceptuels d'évaluation de performances acoustiques pour améliorer la qualité, la rapidité et la fiabilité des évaluations des performances acoustiques dans l'automobile en phase de préconception. Le sujet (f) concerne notre propre sujet de recherche dans les 6 mois à venir et pour lequel nous avons pris un congé sabbatique⁵⁵ : le « *prototypage virtuel de concept* » ou comment coupler intelligemment un modèle d'objectifs avec des évaluateurs de performance de type *métamodèles* [12, 19]. Le sujet (g) traite de l'optimisation de produits complètement définis mais à performances difficilement évaluables.

	Axe B Raisonnements sur des modèles incomplets	Générique/ Appliqué	Chercheur
(e)	Modèles conceptuels d'évaluation performances acoustiques	Appliqué sur cas d'étude Renault	Actuellement, stage de DEA de Hamdi ABDELBASSET chez Renault qui devrait se poursuivre en thèse
(f)	Prototypage virtuel de concept	Générique	Travail personnel lors de notre collaboration avec le Prof. Russel BARTON durant notre CRCT à Pennsylvania State University
(g)	Optimisation de produits difficilement évaluables		Travail personnel et en partenariat avec Dominique FEILLET du

⁵⁵ Il s'agit plus précisément d'un CRCT : Congé de Recherches et de Conversion Thématique, pris de septembre 2001 à janvier 2002.

Tableau 9 : Les sujets de recherche actuels et futurs dans l'axe B

L'axe C *Conception collaborative en préconception* n'est pas pour nous prioritaire.

5.2 Extension de SPEC à des modèles de coûts

Ce sujet de recherche consiste à développer un modèle de coûts permettant :

- d'étendre l'approche SPEC à des indicateurs de valeurs,
- d'étendre l'approche SPEC à la gestion d'une Conception à Coût Objectif (C.C.O.),
- de déboucher sur des fonctionnalités d'aide à la décision d'investissement en réduction de risque,
- de déboucher sur des fonctionnalités d'obtention de compromis, sur les plans technique et financier, entre un maître d'ouvrage (spécifiant le besoin) et un maître d'oeuvre fournisseur des prestations et donc garant des performances⁵⁶.

Nous avons déjà montré avec SPEC qu'une étude de sensibilité nous a permis de juger des points forts et des points faibles des concepts de solution, pour tenter éventuellement de combler certains de ces points faibles. Il s'agit d'une étude de sensibilité de a) *certain aspects de la satisfaction globale du projet* par rapport à b) *certaines perturbations des performances*.

Les **indicateur** b) de satisfaction/risque d'une fonction ou du projet dans son ensemble sont du type : *Probabilité d'échec total, Probabilité de réussite conditionnelle, Probabilité de réussite, Moyenne globale de satisfaction, Ecart type global, Moyenne de réussite, Ecart type de réussite*.

Les **perturbations** des performances a) consistent, pour toutes les performances, soit à voir l'effet d'une *augmentation de la performance*, d'une *diminution de la performance*, ou à voir l'effet d'une *réduction d'incertitude* (réduction de la dispersion autour de la valeur moyenne) de la performance.

Cette étude de sensibilité débouche dans SPEC sur un nombre important de coefficients d'influence, soit ($3_{\text{perturbations}} \times 7_{\text{indicateurs}} \times \text{nombre_de_performances} \times \text{nombre_de_fonctions}$) ce nombre. Le plus souvent on cherche à améliorer le projet globalement ; on choisit donc d'étudier les coefficients d'influence de la fonction de plus haut niveau, mais on peut aussi bien choisir de ne s'intéresser qu'à certaines fonctions du produit. Ces coefficients indiquent alors pour la fonction considérée l'influence éventuelle des variations de performances sur l'indicateur choisi de la fonction (exemple : la *Probabilité de réussite*). Néanmoins, cette influence s'exprime actuellement en pourcentage d'amélioration de l'indicateur *Probabilité de réussite* par unité de variation de la performance. Ces influences ne peuvent donc pas se comparer entre elles car étant dans des unités différentes.

Pour réellement indiquer des préconisations de modification des performances, il faut avoir accès à des données économiques et techniques supplémentaires. En effet il faudrait diviser les coefficients d'influence par les données de coûts de variation d'une

⁵⁶ SPEC a démontré son utilité dans le dialogue entre un maître d'ouvrage qui peut relaxer certaines contraintes du cahier des charges et le maître d'oeuvre qui peut tenter d'améliorer certaines performances à la demande (voir [31]).

unité de performance. On obtiendrait alors les valeurs de sensibilité d'amélioration de l'indicateur de réussite par unité de coût. Ces valeurs pourraient être comparées entre elles et on pourrait alors savoir quelles sont les performances sur lesquelles il est le plus opportun d'investir en priorité. Des données supplémentaires d'intervalles de variation admissibles des performances (en augmentation, en diminution mais aussi en réduction d'incertitude) et de budget total disponible permettraient alors d'en déduire automatiquement la meilleure stratégie d'investissement, ainsi que le gain global pour le projet dans son ensemble.

Améliorer, en phase de préconception, les chances d'aboutissement d'un projet à budget donné est un objectif atteignable.

5.3 Extension de SPEC à des modèles de risques

La notion de risques prise en compte dans la méthode SPEC correspond aux « *risques de ne pas aboutir à la satisfaction suffisante d'une fonction désirée à l'issue du projet* ». Il s'agit là de risques importants qui ne sont pas correctement traités dans les phases préliminaires d'un projet de conception par d'autres approches. Par contre, la méthode SPEC ne donne actuellement que des indicateurs qualitatifs de risque : « *telle fonction est incorrectement satisfaite pour tel concept de solution et rend le projet caduque* ». Les causes des incertitudes, leurs conséquences néfastes (nature, gravité, actions en réduction de risque) et les probabilités (d'occurrence, de détection) ne sont pas actuellement considérés.

Il s'agira donc successivement de :

- 1) Enrichir la description de ces risques en modélisant par exemple leurs causes, leurs probabilités d'occurrence et de détection, leurs conséquences (gravités et coûts), ainsi que les actions en réduction de risques et leur coût probable (très classique en risk management).
- 2) Développer des indicateurs de coûts généralisés prenant en compte les coûts des fonctions (ou des parties du produit) mais tenant aussi compte des coûts induits par les risques (coûts de la détection des causes, des conséquences ou coûts des actions en réduction des risques).
- 3) Développer des fonctionnalités d'aide à la décision en gestion des risques avec un budget projet donné. Doit-on prendre certains risques ou mener certaines actions en réduction de risques, et quand ? Quelle stratégie globale avantages/risques adopter pour aboutir dans un délai limité à un produit de valeur maximale ?
- 4) Etendre l'approche à d'autres notions de risques, notamment à des risques projet utiles à connaître et à réduire en phase de préconception (voir [Courtot 1996]).

5.4 Extension de SPEC à la gestion de projet

L'approche SPEC débouche sur un outil de mesure d'adéquation d'un concept de produit ou service à son cahier des charges à un moment donné du projet en termes de performances et de risques. Pour renforcer le couplage entre les paramètres relatifs au produit et à son projet de conception, le présent sujet de recherche consiste à développer les dimensions dynamique/temporelle et multi-acteurs de cette mesure et à étudier le couplage avec les outils classiques de gestion de projet. Pour cela, on pourra procéder en trois étapes :

- 1) l'établissement d'indicateurs d'évolution des différents risques (donnés par la méthode SPEC) et la génération d'alarmes lorsque ceux-ci n'évoluent pas suffisamment dans le bon sens alors que la date de fin de projet approche,
- 2) le développement d'heuristiques de choix entre plusieurs alternatives/décisions de conception sur la base des risques et des gains (de performances du produit) escomptés,
- 3) la prise en compte de jalons temporels du projet (correspondant à des objectifs précis) dans les deux aspects précédents et la recherche de couplages plus profonds avec les fonctionnalités d'un outil de gestion de projet.

On notera que depuis peu, les progiciels de gestion de projets se dotent de modules de visualisation hiérarchique des objectifs du projet (exemple : module *PC-objectifs* du logiciel *Scitor PS suite*). L'état d'avancement de ces objectifs, ainsi que l'état des ressources financières engagées par exemple, se visualisent très rapidement par des codes couleurs. Dans SPEC, nous avons affaire à un modèle fonctionnel de produit et non aux objectifs du projet. Mais les objectifs du projet (tâches et macro-tâches) contribuent à réaliser les fonctions du produit. On pourra donc, à l'inverse de cette tendance en gestion de projet, faire le chemin inverse pour tenter de prendre en compte un certain nombre de données dynamiques du projet de manière à nourrir notre outil de suivi d'avancement du produit qu'est SPEC.

5.5 Opérationnalisation de la valeur

Une part des raisons expliquant le manque d'indicateurs de conception et le manque d'outils d'aide à la préconception, provient du fait que la « maximisation de la valeur » à effectuer en entreprise, et sur laquelle tout le monde semble s'accorder, est justement la chose la moins bien partagée.

De nombreux débats voient le jour sur la liste Vafore à ce propos (**chapitres 4.1.3** en page 103 **et 7.3** en page 140). Le terme valeur est très polysémique (voir aussi Perrin [Perrin 2001a] et Chazelet et Lhote [Chazelet *et al* 2001]), chacun interprète ce terme selon son métier, son intérêt et la phase du cycle de vie du produit (d'où la notion de chaîne de valeurs [Porter 1986]).

Nous avons déjà proposé une amélioration de deux outils de l'Analyse de la Valeur [34, 35], amélioration basée sur une définition un peu plus opérationnelle de la notion de valeur (notamment en proposant la notion de *valeur d'une fonction relativement à une solution*).

Pour aller plus loin et développer à terme des *indicateurs de valeur* qui ne soient plus le reflet du seul souci du concepteur et du client utilisateur final, nous venons d'encadrer une étude qui consistait à retrouver les fondements de la polysémie du mot valeur (trop galvaudé en ce moment) dans les domaines de la philosophie, de l'économie, de la gestion, du marketing et de la conception [Ben Ahmed 2001]. Nous poursuivons cette étude sur la piste qu'une part importante de l'ambiguïté de ce mot provient du fait qu'il est utilisé au lieu de celui « d'intérêt ». En effet, un intérêt est relatif à une personne ou à un groupe de personnes de manière contextuelle à un cadre ou à une situation. Nous allons travailler à trouver des exemples d'ambiguïté du terme *valeur* dans le domaine des méthodologies de conception de produits comme l'Analyse de la Valeur, de manière à définir des indicateurs moins flous.

Ce travail sur les *valeurs* viendra enrichir le travail de Sinene HAJSALEM actuellement en thèse sur l'approche SPEC qui travaille à des modèles de *coûts* et de *risques* en préconception.

5.6 Modèles conceptuels d'évaluation de performances acoustiques

Pour faire face à une concurrence ardue sur tous les segments des véhicules automobiles et offrir un produit avec une valeur importante pour le client tout en maîtrisant le coût, la R&D d'un constructeur automobile est amenée d'une part à améliorer sans cesse l'adéquation entre les prestations attendues par les clients et celles offertes en série sur les véhicules produits, et d'autre part à diminuer les coûts et les délais de développement.

Parmi les prestations, le confort acoustique apparaît de plus en plus comme une attente des clients, voire comme une exigence intervenant dans le choix ou le non choix d'une voiture.

Il est donc nécessaire que les équipes d'ingénierie prennent en compte, à tous les stades des projets véhicule, des spécifications fonctionnelles et techniques permettant d'atteindre un niveau de prestations acoustiques propre à chaque véhicule. Pour cela, il faut procéder régulièrement à des évaluations de la prestation acoustique, au niveau *a)* du concept, *b)* du modèle géométrique à différents niveaux de détail, *c)* avec prise en compte des procédés de fabrication et d'assemblage, *d)* sur le prototype, *e)* sur le véhicule de série à sa sortie, *f)* sur le véhicule de série durant sa vie.

Le bruit gênant audible par le conducteur et les passagers est dû à plusieurs phénomènes : contact pneumatiques/route, bruits extérieurs, bruits et vibrations internes (moteurs, autres éléments tournants, ventilation...). Parmi ceux-ci la transmission solidienne (par vibrations) du bruit de roulement jusqu'à l'habitacle a une grande importance dans le niveau du confort acoustique. Les propriétés (fréquences et modes propres) de nombreux systèmes mécaniques intermédiaires (trains, berceau, caisse...) entrent alors en jeu. C'est pourquoi il est indispensable que le déploiement de la prestation acoustique se fasse dès l'étape amont du développement véhicule sur les différents systèmes qui y contribuent de manière à influencer dès le départ sur les spécifications et à tout moment sur les validations de ces systèmes.

La prestation acoustique est une « fonction système » (c'est-à-dire impactée par de nombreux sous-systèmes) qui, de plus, est extrêmement sensible (peu robuste) à des niveaux de détail ou modifications mineures de ces sous-systèmes. Pourtant, il est primordial d'être le plus pertinent dans les phases d'avant-projet (niveaux *a* et *b*) pour définir à temps les grandes options qui seront probablement garanties d'une bonne prestation du véhicule (niveaux *e* et *f*). Il s'agit donc quasiment d'un cas d'école de *conceptual design* en ce qui concerne l'évaluation des performances d'un concept (point 3 de la figure **Figure 1**).

En rentrant plus avant dans les détails de ce qui se pratique à l'heure actuelle chez un constructeur automobile :

- Au début de la phase avant-projet (niveau *a*), une négociation sur *l'allocation des volumes enveloppes* des différents systèmes mécaniques a lieu (exemple pour le train et le berceau). Or, la prestation acoustique n'est pas neutre vis-à-vis de ces premiers choix d'architecture, en termes de dimensions, formes des systèmes et

positionnement des liaisons (exemple : positionnement et diamètre des plots de filtration vibratoire). A l'heure actuelle, on ne sait pas décliner la prestation acoustique en préconisations concrètes dans cette phase de négociation des volumes.

- Le processus de déploiement de la prestation acoustique sur les organes est un processus itératif qui se base essentiellement sur l'analyse vibratoire par éléments finis de structures finement maillées. Il s'agit donc là d'un outil d'analyse lourd (car coûteux en temps de calcul) qui ne caractérise pas des champs de solutions (ceux relatifs à un concept d'organe) et qui n'apporte pas une grande aide lorsqu'il s'agit d'explorer le champs des possibles pour préconiser un changement dimensionnel sur un organe (le processus reste de la part du concepteur le classique essai/erreur sur un nombre très limité de modifications dont il a l'intuition).
- Lorsque le concepteur désire travailler sur un modèle géométrique simplifié des organes⁵⁷, il ne dispose pas d'aide globale qui lui permette d'estimer la fiabilité de sa performance acoustique finale relativement à ce qu'il serait nécessaire au moment où celle-ci lui est utile⁵⁸. Or, dans la phase d'allocation des volumes enveloppes, une estimation « assez grossière » de certaines performances acoustiques pourrait être suffisante.
- Les modifications proposées après analyse vibratoire par éléments finis des organes qui tiennent compte du déploiement du cahier des charges des prestations acoustiques sont très difficilement prises en compte vu que les organes ont déjà été optimisés pour d'autres prestations telles que la tenue statique, le confort en comportement dynamique et tenue de route et l'endurance dynamique. A ce jour, l'analyse pour la prestation acoustique se situe en aval du déploiement des autres prestations.

Le besoin s'est donc fait sentir, chez Renault S.A., lors du stage de Hamdi ABDELBASSET (voir **Tableau 2** en page 23), de développer des modèles d'évaluation de performances acoustiques dans les phases de préconception dans le but de :

- Avoir des éléments de négociation, dans la phase d'allocation de volumes enveloppes, qui s'expriment en termes de contraintes sur des dimensions géométriques compréhensibles par les architectes, sur les bases de la prestation du confort acoustique à atteindre.
- Pouvoir estimer les performances acoustiques (vibratoires) de plusieurs configurations d'organes avant que le nombre d'alternatives soit très réduit par le déploiement des autres prestations de façon à donner les bonnes orientations vers le compromis final avec un minimum de coût de calcul et de dispersions.

⁵⁷ soit pour réduire le temps de calcul élémentaire et ainsi tester plus de solutions, soit parce qu'il est en phase avant-projet (niveau *b*) et que les détails n'existent pas encore

⁵⁸ Le niveau de fiabilité désiré d'une évaluation de performances à un stade donné est souvent méconnu par l'ingénieur lui-même.

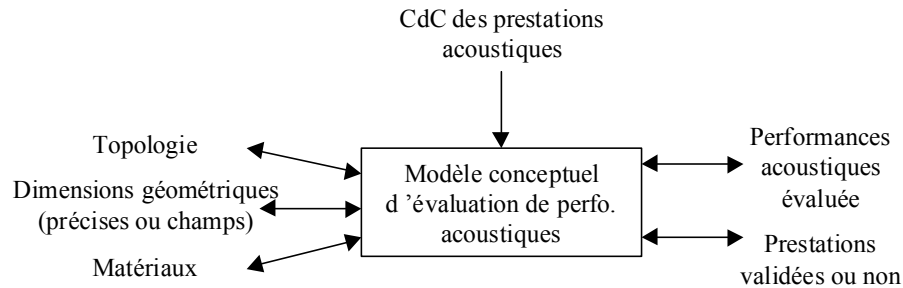


Figure 42 : Le rôle d'un modèle conceptuel d'évaluation de performances acoustiques

Un tel modèle « conceptuel » d'évaluation de performances acoustiques peut être vu comme une fonction de transfert bidirectionnelle entre d'une part le domaine du concept de véhicule (topologie, dimensions géométriques définies de manière précise ou par des champs de valeurs, matériaux) et d'autre part le domaine des performances (voir figure **Figure 42**). On retrouve la notion de *mapping* présentée au chapitre 2.3.4.5, page 50. De multiples stratégies sont possibles pour envisager des modèles conceptuels d'évaluation de performances acoustiques (voir figure **Figure 43**). Mais chacun des modèles :

- présentera des difficultés de mise en œuvre particulières (ex : manque de données, au vu du nombre de degrés de liberté du problème, pour effectuer un modèle paramétrique),
- aura des prestations différentes entre les deux domaines selon :
 - *la nature des résultats* : un modèle pourra non pas déboucher sur l'évaluation d'une *valeur précise* de performance mais sur un *champs de performances* ou sur une *contrainte* dans le domaine des performances, ou encore sur la *validation ou pas d'une prestation* acoustique sans avoir accès à la valeur de la performance acoustique (ça peut être le cas d'un *modèle basé sur les cas*),
 - *l'étendue des résultats* car certains modèles seront à même de prédire certains résultats (ex : certaines performances acoustiques comme les fréquences propres) et pas d'autres (ex : modes propres),
 - *le sens de la propagation* : on peut penser aller dans le sens de l'*analyse* classique c'est-à-dire du domaine du concept vers le domaine des performances, mais on peut également imaginer qu'un niveau de prestations acoustiques puisse générer des contraintes dans le domaine du concept (sens de la *synthèse*),
 - *la fiabilité des résultats* au vu des hypothèses et des modèles simplificateurs utilisés,
- de ce fait, chaque modèle sera plus ou moins adapté à une phase du processus d'avant-projet.

Ce sujet de recherche qui débute, au travers d'un DEA, par une cartographie fonctionnelle des modèles conceptuels d'évaluation de performances acoustiques en fonction de l'avancement du projet et du métier d'ingénierie concerné (architecte, fonction prestation, concepteur organe...) se poursuivra en thèse par la mise au point de quelques modèles et par celle de leur stratégie d'utilisation pour des besoins ciblés.

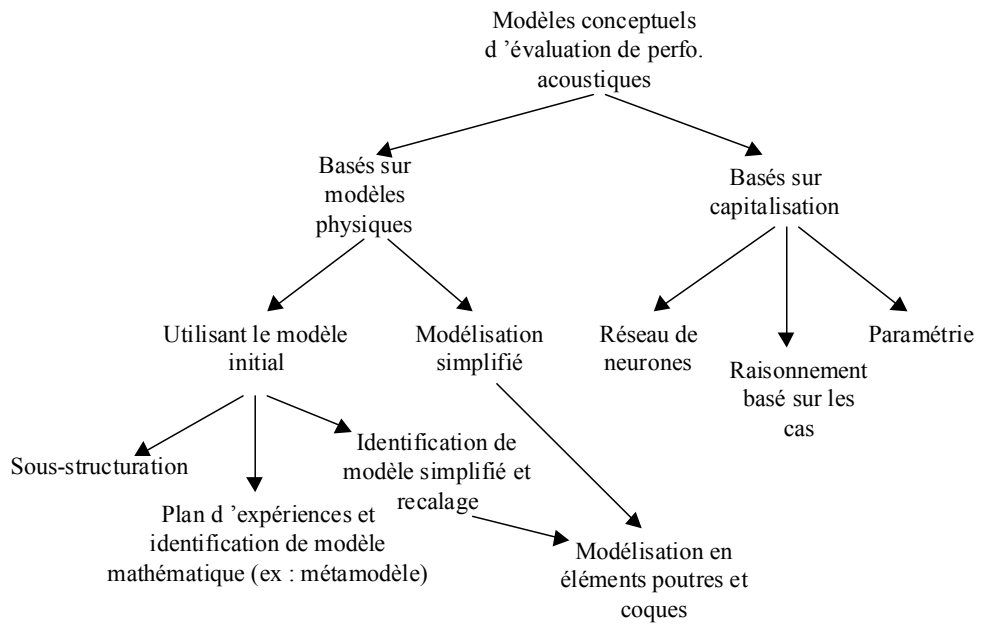


Figure 43 : *Stratégies d'élaboration de modèles conceptuels d'évaluation de performances acoustiques*

5.7 Prototypage virtuel de concept

Le Professeur Russel BARTON, de Pennsylvania State University est venu en France en année sabbatique en 1999/2000 et a collaboré avec nous à un couplage de son approche de métamodèles (modèles numériquement approximatés de simulateurs de performances) et d'un modèle d'objectifs de type SPEC (voir [12, 19]). Nous avons décrit nos résultats dans le sujet de recherche (15) en page 94.

Nous poursuivrons cette collaboration de septembre 2001 à février 2002 durant notre congé de recherche CRCT aux Etats-Unis. Nous sommes intimement convaincus qu'en utilisant une bonne stratégie de métamodélisation pour estimer les performances d'un concept rapidement, et des modèles de satisfaction/préférence comme ceux de l'approche SPEC (voir sujet (4) en page 16 et sujet (14) en page 92), nous pourrions aborder le **prototypage virtuel d'un concept** car nous aurions un mapping PP de type 1+2 (voir chapitre 2.3.4.5 en page 50).

Par la suite, nous envisageons plusieurs pistes de recherche :

1. **Réflexion sur la meilleure stratégie de métamodélisation entre les paramètres de conception et la satisfaction globale.** Vaut-il mieux effectuer des métamodèles globaux ou avoir une stratégie d'association de métamodèles de sous-systèmes ? (voir Figure 44). Cette seconde stratégie est plus adaptée à des modifications locales. Nous pourrions le tester sur l'exemple de la lampe de bureau. Un métamodèle du modèle de satisfaction peut même être prévu.

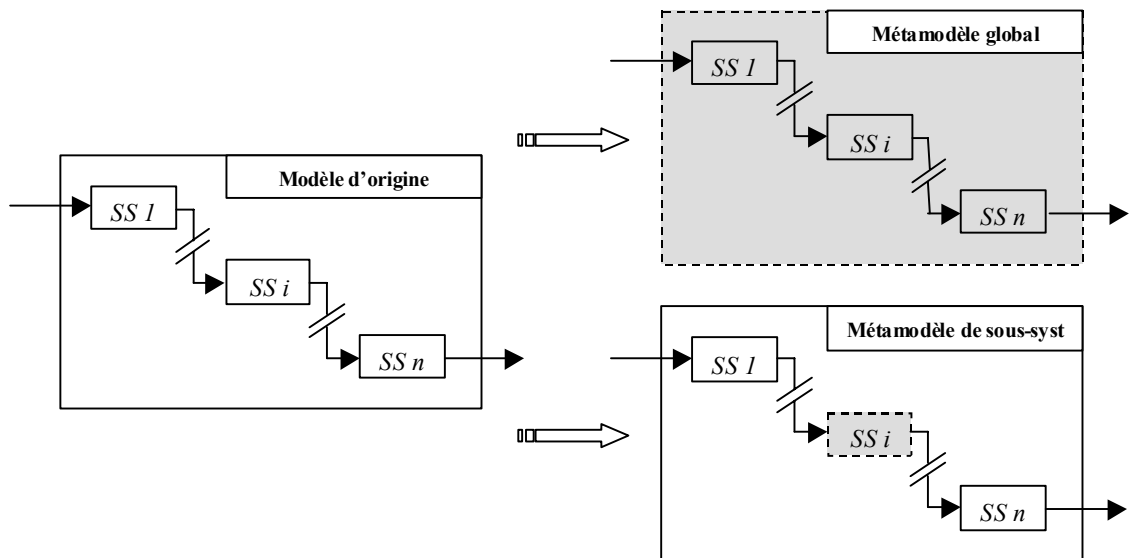


Figure 44 : Recherche de stratégie de métamodélisation

2. **Le problème du mapping direct d'une plage de paramètres de conception** sera abordé. Puisque les métamodèles permettent des calculs rapides, diverses méthodes numériques permettront de calculer la projection de ces plages de paramètres de conception sur les performances fonctionnelles et sur les satisfactions de toutes les fonctions du modèle fonctionnel des objectifs de SPEC.
3. Une autre stratégie pour explorer ces plages de variabilité du concept, n'est pas de calculer les plages de performances mais d'utiliser une visualisation

graphique rapide au dessus d'un métamodèle pour permettre à un concepteur de se **faire une idée de l'espace des performances, des satisfactions et même de l'espace des paramètres de conception**. Barton et Simpson ont déjà établi un sujet de recherche [Barton *et al* 2000b] intitulé « Impact of Metamodel-Driven Visualization on Design ». Celui-ci a été financé en 2000 par la National Science Foundation ; le projet prévoyant notre intervention notamment sur le cas d'étude de la lampe de bureau (voir **Figure 46** pour le principe et la **Figure 46** pour l'extrait du projet nous concernant).

4. Etudier les possibilités d'inversion de métamodèles de performances ou de satisfaction pour aller dans le sens de la réduction de la plage des paramètres de conception.

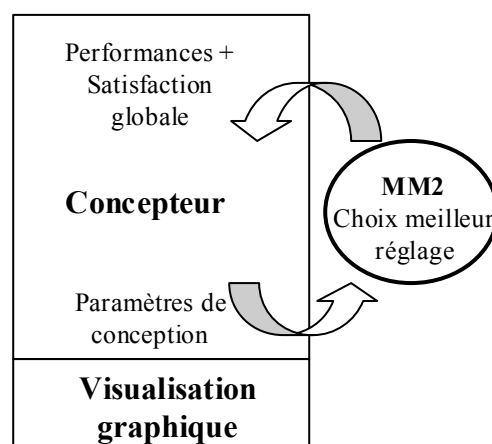


Figure 45 : Exploration du concept de lampe de bureau par visualisation rapide au dessus d'un métamodèle

We plan to test the effectiveness of our design interface ideas with collaborators at Ecole Centrale Paris, led by Asst. Prof. Bernard Yannou. Prof. Yannou and his students developed the parametric Pro/Engineer solid model for the desk lamp shown in Figure 2 and have collaborated with Prof. Barton and his students on metamodeling strategies for discrete and continuous responses (Meckesheimer, et al., 2000). Furthermore, they have an interest in the propagation of design uncertainties to performance uncertainties and consequently to uncertainties in user satisfaction; we have explored this issue from a metamodeling perspective (Barton, et al., 1999). They will collaborate on the development of the graphical interface for the desk lamp example and provide global satisfaction measures to help assess design quality. Prof. Yannou and his researchers will participate in the distributed design portion of the assessment experiment. For the desk lamp application, the reflector design and arm length choice will be conducted at geographically distributed locations: the Laboratoire Productique Logistique at Ecole Centrale Paris and the IDDRL and Engineering Design & Optimization Labs at Penn State. Prof. Yannou and his students will examine other issues related to our work, including the characterization of risk associated with delays in fixing certain design parameter values while requiring earlier decisions for other parameters.

Figure 46 : Extrait du projet de recherche de Barton et Simpson [Barton *et al* 2000b]

5.8 Optimisation de produits difficilement évaluable

Depuis deux ans, nous encadrons un travail de recherche sur l'optimisation de l'arrangement des lettres sur un clavier d'ordinateur (pour une langue). Ce problème nous a intéressés car il s'agit d'un problème d'optimisation de produit difficile car le produit est incomplètement défini au sens où ses performances sont difficilement évaluable (heuristiques d'ergonomie très controversées, *ill-defined problem*) et que la fonction d'évaluation est complexe.

Il fallait trouver une méthode d'optimisation qui minimise le nombre d'évaluations globales de solutions. Nous avons naturellement convergé vers les *systèmes de colonies de fourmis* (ACS : *Ant Colony Systems*), algorithmes forts prometteurs pour certaines classes de problèmes. Ceux-ci ont été proposés par Dorigo, Maniezzo et Colorni dans [Dorigo *et al* 1996].

Les résultats sont probants car les claviers ont été, à notre surprise, assez sensiblement améliorés par rapport à des solutions optimales établies manuellement depuis des années. Des stratégies particulières d'ACO adaptées au problème sont testées. D'un point de vue conception de produit, nous nous intéressons aux problèmes de la justification du modèle complexe des règles ergonomiques et au problème de la robustesse de la solution (important pour aboutir à un nouveau standard de clavier justifiable).

5.9 Domaines et théories scientifiques à approfondir

Dans les années, voire les mois qui viennent, et vues les pistes de recherche sur lesquelles nous nous lançons, nous prévoyons d'approfondir nos connaissances et d'emprunter des résultats de recherche dans les domaines principaux suivants :

- **L'Ingénierie du Besoin** ou *Requirements Engineering*,
- **Le *conceptual design***, au niveau des méthodes génériques
- **L'aide à la décision multi-critère**,
- **L'Ingénierie Système**.

De manière secondaire, nous irons approfondir :

- La théorie de l'utilité,
- Les théories de compromis entre valeurs et risques,
- Le *Earned Value Management*,
- Le C.A.I.V., *Cost As Independent Variable*,
- Le prototypage virtuel,
- La gestion des risques.

6. Enseignement

6.1 Activités d'enseignement

6.1.1 Formation initiale

Nos enseignements en formation initiale (c'est-à-dire hors DEA) se sont essentiellement déroulés au sein de l'Ecole Centrale Paris, soit en tronc commun (deux premières années), soit au sein d'options de 3^{ème} année comme ICP (Innovation - Conception - Production), SyA (Systèmes Avancés) ou MMS (Modélisation Mécanique des Structures). Notons toutefois des interventions, toujours à l'ECP, en Mastère S&T (Stratégie et Technologie) et en Formation Continue RCPIS (Responsable Chef de Projet en Ingénierie concourante et Simultanée).

Nous avons veillé à effectuer certains enseignements hors de l'ECP, citons le Mastère IPP (Ingénierie des Processus de Production) de l'ENS Cachan, et le DEA 3S (Solides, Structures et Systèmes mécaniques) de l'ENS Cachan.

Les modules de cours principaux sont détaillés dans le **Tableau 10**.

Mécanique	Mécanique générale Tronc commun ECP (assistant en TP de 1991 à 2000)	
	Théorie des mécanismes Tronc commun ECP (cours, 30 ét, de 94 à 98)	Un polycopié : [a] Yannou, B., Conception de systèmes mécaniques - Éléments de théorie des mécanismes pour la conception de systèmes mécaniques, 1995, cours de l'Ecole Centrale Paris.
	Conception Assistée par Ordinateur Depuis 1991 Tronc commun ECP, Options ICP, SyA, MMS, Formation Continue RCPIS, Nouvelle Filière « Conception, R&D »	Enseignement théorique de la CAO, puis formation pratique sur les logiciels Catia (91 à 94), puis Pro-Engineer. En 2001, nous formons à peu près 120 étudiants par an à une pratique de la CAO, se concrétisant par un projet de modélisation en monôme ou binôme. Deux polycopiés : [b] Yannou, B., <i>Formation au logiciel de CAO Pro-Engineer</i> , 1998, cours de l'Ecole Centrale Paris. [c] Yannou, B., <i>Conception Assistée par Ordinateur - Historique, Problématiques, Modèles, Logiciels, Futur</i> , 1997, cours de l'Ecole Centrale Paris. Une publication dans les Techniques de l'Ingénieur : [41]. Voire l' annexe 7.1.4 pour une présentation détaillée.
Méthodologies	Analyse Fonctionnelle, Analyse de la Valeur	Ce cours s'appuie sur des publications effectuées dans ce domaine et insiste sur :

conception de produits	Depuis 1994, option ICP, Mastère S&T de l'ECP De 1996 à 1999 : Mastère IPP (ENS Cachan)	<ul style="list-style-type: none"> - le cahier des charges fonctionnel - le choix et la quantification des critères - les indicateurs de conception et le choix d'une meilleure solution - la place de l'innovation <p>Un polycopié :</p> <p>[d] Yannou, B. Analyse Fonctionnelle, Analyse de la Valeur, cours de l'Ecole Centrale Paris.</p>
	Analyse des processus d'innovation Option ICP depuis 95 et Nouvelle Option Génie Industriel (à compter de sept 2001)	Ce nouveau module sur l'innovation tente de présenter l'innovation selon de multiples points de vue : les techniques d'innovation produit et l'innovation à travers l'histoire, mais aussi les conditions externes à l'entreprise (le marché, la protection industrielle) et internes (l'organisation, les hommes, la créativité, le knowledge management, la stratégie d'entreprise) favorables à la réussite des inventions. Voir l' annexe 7.1.1 pour une présentation détaillée.
	Analyse fonctionnelle et analyse des valeurs Nouvelle Option Génie Industriel, à compter de sept 2001	<ul style="list-style-type: none"> - Analyse de la valeur des processus et des organisations, management par la valeur - Chaînes de valeurs - Indicateurs de valeurs - Processus de conception à objectif coût - Valeur d'une information d'une connaissance, d'une compétence <p>Voir l'annexe 7.1.2 pour une présentation détaillée.</p>
	Conception des produits et services Nouvelle Filière « Conception, recherche et développement », à compter de sept 2001	Version étendue du cours AF-AV, présentant les principales méthodes de conception, reconception et innovation sur les produits, ainsi que des notions d'ingénierie système. Voir l' annexe 7.1.3 pour une présentation détaillée.
Projets	Projets de Conception de Systèmes Innovants (CSI) Option ICPet DEA GSI spécialité IPS, depuis 1996	<p>Ces projets CSI ont pour but de mener un projet de conception de produit l'idée à l'avant-projet sommaire (concrétisé par une maquette physique) en passant par les phases de veille informationnelle (orientée intelligence économique), de dossier d'Etude d'Opportunité de projet, de Cahier des Charges Fonctionnel, de séance de créativité, de dossier d'Avant Projet Sommaire. Ces projets traitent de projets d'innovation souvent en collaboration étroite avec des industriels. Voici le témoignage de l'un d'entre eux :</p> <p>"Cette première collaboration avec ICP dans le cadre d'un projet CSI a donné des résultats au delà de mes attentes: une étude de l'existant - brevets et exécutions de qualité professionnelle, une méthodologie de développement solide et une concrétisation de l'idée finale en la forme d'un prototype qui nous permet de présenter l'idée aux consommateurs. Un tel résultat a été possible grâce aux moyens mis à la disposition des élèves et à l'efficacité et au suivi d'un corps enseignant très dynamique. Au net, les projets CSI permettent un rapprochement très productif de l'Ecole et de l'industrie et un enrichissement mutuel, une expérience que je désire renouveler dans le futur."</p> <p><small>Jean-Luc Assadi, Badier & Derrier, P&D, Product & Control, Italia</small></p>

		Research Center
	Techniques de maquettage de produits Tronc commun ECP, Option ICP	Effectuée avec un designer professionnel, au centre de ressources CRIC (voir une description en annexe 7.2), cette formation présente les fondamentaux sur les techniques de maquettage rapide de produits.
	Encadrement de Projets « En Equipe » Tronc commun ECP	Ces projets « en équipe » regroupent de 6 à 12 élèves ingénieurs et s'étalent sur plusieurs années. Citons le projet « clavier ergonomique » (http://www.pl.ecp.fr/clavier/) et le projet « kidam » ayant débouché sur le lancement d'une épreuve sportive de « vélo couché » entre établissements d'enseignement supérieur (http://testi.cti.ecp.fr/~kidam/)
Techniques informatiques	Intelligence Artificielle appliquée à la mécanique et au génie industriel Option ICP jusqu'en 1995, DEA 3S (ENS Cachan) de 1996 à 1998	Présentation des concepts des techniques d'IA les plus adaptées à des modélisations en mécanique et en génie industriel : <ul style="list-style-type: none"> - Programmation par Contraintes [8], - Prolog, - Logique floue, - Réseaux de neurones - Systèmes à base de connaissances Illustrations d'exemples de modélisation de problèmes génériques dans le domaine de la mécanique et du génie industriel.

Tableau 10 : Modules de cours en formation initiale

6.1.2 DEA de Génie des Systèmes Industriels

Présentation du DEA

Le DEA de Génie des Systèmes Industriels a pour but d'apporter un complément de formation par la recherche et (pour certains étudiants) de débiter des recherches (en vue du doctorat) dans le domaine de la conception des produits, des systèmes et des processus. Le programme d'enseignement est articulé autour des méthodes scientifiques d'organisation, de gestion, de capitalisation des connaissances, d'apprentissage, d'évaluation, d'optimisation...

En plus des orientations vers la recherche, cet enseignement est destiné à répondre à la très forte demande en compétences méthodologiques transversales par les entreprises aussi bien manufacturières que de service.

Organisation de la scolarité

La scolarité comporte trois parties principales :

- 75 h de cours de tronc commun dispensées sur les trois sites de l'EC Paris, l'EC Lille et l'EC Lyon :
 - TC1 : Conception, décision et stratégie
 - TC2 : Modélisation, capitalisation de connaissances, apprentissage
 - TC3 : Optimisation et gestion des processus et des compétences
 - TC4 : Evaluation des performances et optimisation des flux

- TC5 : Epistémologie et pratique de la recherche
- 75 h de cours d'option parmi les 4 options suivantes :
 1. Spécification, conception et évaluation des systèmes d'information, à l'EC Lille
 2. Spécification, évaluation des systèmes logistiques industriels, à l'EC Paris
 3. Ingénierie de développement des produits et systèmes (IPS), à l'EC Paris
 4. Ingénierie et organisation des systèmes complexes, à l'EC Lyon
- Un stage d'initiation à la recherche, d'une durée de 4 à 6 mois.

Présentation de l'option IPS (Ingénierie de développement de Produits et Services) dont nous avons la responsabilité

L'industrie des biens et des services porte une attention de plus en plus accrue sur les premières phases d'un projet de développement car ces phases engagent souvent irrémédiablement la plus grande part des investissements et des ressources d'une entreprise. En premier lieu, pour des raisons de pertinence économique, il s'agit de bien caractériser la problématique du marché (clients, produits, concurrents, partenaires, fournisseurs), la technique du moment (technologies, brevets, normes), les pratiques sociétales. Il s'agit ensuite de bien traduire cette problématique au sein de l'entreprise en tenant compte de son savoir-faire, de ses ressources, de son image et de sa stratégie. Une fois la problématique traduite (cahier des charges), la faisabilité démontrée et le projet pré-dimensionné, il faut concevoir le projet lui-même (processus de conception) en gérant simultanément des flux d'informations, d'actions et de ressources. Le projet doit se concevoir de manière simultanée avec le produit avec un constant souci de maîtrise des risques et de caractérisation des actions et ressources engagées en terme de valeur ajoutée au produit. Des indicateurs de valeurs, performances et risques doivent donc être mis en place concernant le projet et son résultat le produit ou le système, de manière à assurer des rétroactions salutaires. La maîtrise des risques passe aussi par la réutilisation des savoir-faire capitalisés tout au long du processus de développement.

Cette option se propose de présenter aux étudiants les pratiques et défis actuels de l'ingénierie de développement des produits et systèmes, ainsi que les approches et modèles en recherche.

Cette option se décompose en 5 modules de cours :

- **Op31 : Méthodes de conception de produits, Bernard Yannou, 15 h**
- Op32 : Elaboration des processus de conception, Jean-Claude Bocquet, 15 h
- **Op33 : Valeur et performance en conception, Bernard Yannou 15 h**
- Op34 : Gestion simultanée des flux d'information, d'action et physiques, Jean-Claude Bocquet, 15 h
- Op35 : Capitalisation des connaissances en conception, Mounib Mekhilef, 15 h

Notre intervention dans le DEA

Notre activité dans l'enseignement et l'animation du DEA se présente comme suit. Nous effectuons les cours de tronc commun TC5 et TC1 (en commun avec Ph. Deshayes de EC Lille et S. Mira-Bonnardel de EC Lyon). Nous avons la responsabilité de l'option IPS : Ingénierie de développement de Produits et Services. Au sein de cette option, nous avons la responsabilité des deux modules Op31 et Op33 pour lesquels

nous faisons intervenir, pour partie, des intervenants extérieurs, spécialistes de leur domaine. Enfin, les étudiants de DEA ont leur enseignement d'option validé par un projet bibliographique et un projet de recherche que nous contribuons à encadrer. Il en est de même pour le stage de fin d'études d'une durée de 4 à 6 mois.

Détail de nos cours de DEA

<p>Op31 : Méthodes de conception de produits</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Analyse fonctionnelle et systémique du besoin - Logique d'établissement d'un Cahier des Charges Fonctionnel - Phasage d'un projet - Logique de reconception d'un produit - Logique de reconception d'un processus - Développement d'un système complexe - Innovation : typologie, créativité en groupe, recherche de voie technologique, méthode d'innovation TRIZ
<p>Op33 : Valeur et performance en conception</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Vision sociologique du produit : valeurs des produits dans le temps, image, usages, influences culturelles dans la perception, le produit dans son environnement, veille sociétale - Marketing de la valeur - Valeur d'une information - Méthodologies globales de conception : Analyse de la valeur, Quality Function Deployment - Valeur d'une innovation : veille informationnelle et intelligence économique, valeur d'un brevet, stratégies d'une protection et d'une valorisation de l'innovation - Valeur des brevets - Méthodes de choix d'une meilleure solution, Indicateurs de conception - Risques produit, Risques projet <p>Voir l'annexe 7.1.5 pour une présentation détaillée.</p>
<p>TC5 : Pratique de la recherche</p>	<ul style="list-style-type: none"> - La démarche du chercheur : différences d'objectifs chercheur / ingénieur, processus de résolution de problème pour un chercheur, définition(s) de la recherche - Le monde de la recherche : à quoi mène la recherche, les documents et l'organisation de la recherche - Les méthodes du chercheur : Quoi lire, comment lire, comment en rendre compte, comment publier, avec qui travailler - Le stage de DEA - Table ronde avec des chercheurs
<p>TC1 : Conception, décision et stratégie – Partie « Théories et outils de la conception informatisée »</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Vision globale de la conception informatisée - Théories de la conception, les modèles fonctions-structures : Analyse de la Valeur, Quality Function Deployment (Q.F.D.), A.M.D.E.C., F.A.S.T., arbre des voies technologiques, axiomatic design, TRIZ - Méthodes d'analyse versus synthèse : application au cas de la conception d'un mécanisme - Modélisation et raisonnement sur des données incomplètes : programmation par contraintes, physique qualitative, modeleurs paramétriques et variationnels

	<ul style="list-style-type: none"> - Modélisation et raisonnement sur des données incertaines et imprécises : logique floue, simulation de Monté-Carlo - Identification de modèles : métamodèles, réseaux de neurones - Le concept d'agent : langages objets, systèmes multi-agents, les KBS (knowledge-based systems), algorithmes génétiques, automates cellulaires
--	--

Tableau 11 : *Modules de cours en DEA de Génie des Systèmes Industriels des Ecole Centrale Paris, Lille et Lyon*

6.2 Responsabilités pédagogiques

Nous avons été amenés à prendre diverses responsabilités pédagogiques au cours de nos deux années de chef de travaux (1993 à 1995) puis nos 6 années de Maître de Conférences (1995 à 2001). Ces responsabilités sont principalement :

- Responsable-adjoint de l'option de dernière année Innovation-Conception-Production (ICP : 35 étudiants) de l'Ecole Centrale Paris, à partir de 1997
- Initiateur et responsable du « Centre de Ressources pour l'Innovation et la Conception » de l'ECP, le CRIC (<http://www.pl.ecp.fr/cric/>, annexe 7.2),
- Initiateur et responsable des projets CSI (Conception de Systèmes Innovants) en option ICP (voir description au **chapitre 6.1.1**) depuis 1996
- Responsable CAO de l'école depuis 1994

6.3 Publications à caractère pédagogique

Deux publications ont été effectuées sur l'expérience de l'enseignement de l'ingénierie intégrée et simultanée [Bocquet *et al* 1997b; Vittecoq *et al* 1993]⁵⁹.

D'autres publications ont pu être faites à l'occasion de la valorisation de projets « en équipe ». C'est le cas notamment du projet « Clavier Ergonomique ECP » qui a été largement médiatisé pour rechercher des partenaires industriels :

- **Partenaire d'entreprise, France Info**, *Clavier Ergonomique ECP*, 27 mai et 29 juin 1999.
- **Serveur ZDNet.fr**, *Clavier ergonomique breveté cherche partenaire commercial*, 30 novembre 1999.
- **Magazine « Entreprendre »**, *Un clavier ergonomique*, Novembre 1999, p98.
- **Revue « Courrier ANVAR »**, *La nouvelle touche du clavier*, Novembre 1999.
- **Revue « Science et Vie »**, février 2000, p38, et rubrique « courrier du lecteur » en avril 2000.
- **Magazine « Euréka »** en février 2000
- **Magazine pour enfants « Wapiti »** en février 2000
- **Magazine « Viva »** (magazine des mutuelles) en juillet 2000

⁵⁹ Ces publications n'ont pas été intégrées dans les statistiques de publication précédemment présentées au **chapitre 1.3**, qui portaient exclusivement sur les publications à caractère de recherche.

- Pour en savoir plus, le site web <http://www.pl.ecp.fr/clavier> (voir Figure 47)



Figure 47 : Le serveur du clavier ergonomique ECP

C'est également le cas pour le projet « Kidam » avec :

- 2 publications dans la **revue Technologie**, fin 1999

7. Annexes

7.1 Quelques programmes détaillés de modules de cours

7.1.1 Module « Analyse des processus d'innovation »

Formation en : Option « Génie Industriel » (option créée à partir de septembre 2002, issue de la réforme de l'enseignement de 3^{ème} année ECP)

Durée : 30 h

Bernard Yannou et Julie Cardinal Le Cardinal	Approches fonctionnelles garantes de l'innovation	Approche fonctionnelle, notion de juste nécessaire, notion de valeur	
		Cahier des charges fonctionnel	
		Décortiquage d'un processus	3h
		Fonctions techniques - Décortiquage de produits (travailler en TD sur arborescences fonctions techniques et bibliothèques fonctionnelles de solutions): rapes, couteaux, presse-agrume, tire-bouchons, rasoirs	3h
		Notion d'arborescence fonctionnelle (arbre fonctionnel, FAST, SADT)	
Jacques Perrin	L'innovation à travers l'histoire de la conception de produits	Innovation et conception - Historique, état de l'art	3h
Michel Goyhenetche	L'innovation et le marché	Marketing de la valeur	3h
Catherine Laval	Innovation et traçabilité	Systémique - développement système complexe	
		Risques liés à l'innovation	
		Traçabilité de l'innovation (Arbre des Voies Technologiques), choix raisonné lié au principe et au risque	3h
Denis Cavallucci	Innovation systématique produit	Méthode d'innovation TRIZ	
		TP sur Tech Optimizer	1,5 j
Michel Abello	Innovation et protection industrielle	Valeur d'une innovation : valeur d'un brevet, stratégies d'une protection et d'une valorisation de l'innovation	3h
Marie-Pierre Rioton	Culture d'entreprise, stratégie, organisation, créativité pour l'innovation	Interculturalité, éléments propices à l'innovation, blocages, constitution d'équipe, Méthodes de créativité	3h
Jacques Civilise	Témoignage industriel (management de projet innovant)	Le management orbital de l'innovation	3h conf
CONTROLE		Cas d'étude portant sur plusieurs aspects présentés en cours	Tps libre

Tableau 12 : Détail du module « Analyse des processus d'innovation » dans la future option Génie Industriel (2001-2002)

7.1.2 Module « Analyse Fonctionnelle, Analyse des Valeurs »

Formation en : Option « Génie Industriel » (option créée à partir de septembre 2002, issue de la réforme de l'enseignement de 3^{ème} année ECP)

Durée : 30 h

Bernard Yannou et Julie Le Cardinal	Approche intuitive	Fonctions techniques - Décorticage de produits (travailler en TD sur arborescences fonctions techniques et bibliothèques fonctionnelles de solutions): rapes, couteaux, presse-agrume, tire-bouchons, rasoirs	3h
	AV - Projet	AV : définition, l'esprit, l'historique, les phases AV, le groupe, les normes	
Ingénierie système : déploiement récursif des CdCF, et STB (Spécifications Techniques du Besoin), cycle en V, norme ANSI EIA 632		1h30	
Michel Goyhenetche	Le marché	Marketing de la valeur	3h
Jacques Perrin	Polysémie du terme valeur	en économie, marketing, gestion, conception	3h
Claudette Sèze	Vision sociologique du produit	<i>valeurs</i> des produits dans le temps, image, usages, influences culturelles dans la perception, le produit dans son environnement, veille sociétale	3h
Bernard Yannou et Julie Le Cardinal	AFE - CDCF	Arborescences fonctionnelles (arbre fonctionnel, FAST, SADT)	
		Approche fonctionnelle, notion de juste nécessaire, notion de valeur	
		Besoin fondamental - Notions de système - frontière - objet d'étude	
		Fonctions externes (+ pieuvre), cycle de vie	
		Critères (+ caractérisation)	
		Valorisation des critères et fonctions (TCMC : <i>méthode du Tri Croisé de Monté-Carlo</i>)	1h
		Cahier des charges fonctionnel	3h
	AFI - Choix de solutions	AFI, Liens fonctions-structure (Tableau d'AF, Bloc Diagramme Fonctionnel)	1h
		Evaluation et choix de solutions en AV - Quality Function Deployment	1h30
		Suivi des performances et incertitudes en conception : la méthode SPEC	(1h)
AV - Processus	Décorticage d'un processus : décomposition fonctionnelle, amélioration/optimisation vs reconception		
	AV processus, les outils spécifiques	3h	
Dérivés de l'AV	CCO-COD (Conception à Coût Objectif - Conception à Objectif Désigné).		
	Management par la Valeur	1h30	
CONTROLE		Cas d'étude portant sur plusieurs aspects présentés en cours	3h

Tableau 13 : Détail du module « Analyse Fonctionnelle, Analyse des Valeurs » dans la future option Génie Industriel (2001-2002)

7.1.3 Module « Conception des produits et services »

Formation en : Filière « Conception, Recherche et développement » (filière créée à partir de septembre 2002, issue de la réforme de l'enseignement de 3^{ème} année ECP)

Durée : 15h

Objectifs :

- Permettre à l'étudiant d'intégrer toutes les dimensions de la valeur d'un produit (valeur pour qui, de quoi, valeurs ajoutées)
- Permettre à l'étudiant de se familiariser avec les approches fonctionnelles d'expression du besoin d'un produit et d'un processus
- Lui permettre d'intégrer la logique de développement d'un projet, à la fois structurée (par la valeur du produit) et laissant la place à la créativité.
- Le former à des logiques de conception et reconception d'un produit et d'un processus
- Lui donner une approche systémique pour aborder la conception d'un système complexe
- Le former à des méthodes pour susciter l'innovation
- Lui faire prendre conscience du compromis, au sein d'un projet, entre risques, performances, coûts et délais
-

Démarche : L'approche pédagogique adoptée est de type inductive : susciter le questionnement des étudiants, les faire travailler sur des mini-cas d'étude, conclure sur les pratiques existantes. De tels cycles d'environ une heure et demi doivent permettre aux étudiants de s'imprégner de la justification de méthodologies de résolution de problèmes et d'organisation de la conception de produits, au sens large.

Plan de l'intervention :

- Introduction aux théories assises de la conception (« Axiomatic Design » de Suh, « Systematic Analysis » de Pahl et Beitz, Analyse de la Valeur et Management par la Valeur, les modèles fonctions-structures en mécanique, la méthode TRIZ)
- Initiation à la modélisation systémique
- Méthodes globales de conception : Analyse de la Valeur (AV), Quality Function Deployment (QFD)
- Définitions de la valeur d'un produit ou service, chaîne de valeurs
- Analyse Fonctionnelle (AF) et systémique du besoin
- Logique d'établissement d'un Cahier des Charges Fonctionnel
- Phasage d'un projet dans une action AV (cycle de vie produit, cycle de développement en V)
- Logique de reconception d'un produit (gisement de valeurs)
- Méthodes de choix d'une meilleure solution
- Développement d'un système complexe
- Notions de risques produit à tous les stades de conception
- Notion de management par la Valeur

- Conception à Coût Global Objectif (CCGO), Conception à Objectif Désigné (COD)

7.1.4 Module « Conception Assistée par Ordinateur »

Formation en : Filière « Conception, Recherche et développement » (filière créée à partir de septembre 2002, issue de la réforme de l'enseignement de 3^{ème} année ECP)

Durée : 15h

Objectifs :

- Donner aux étudiants l'idée des pratiques actuelles de CAO au sens large, au sein des entreprises, et de son enjeu sur l'augmentation de qualité, la réduction des délais, le travail collaboratif, la capitalisation des données produits et méthodes, l'intégration et la diversité des outils de modélisation et d'analyse
- Leur faire acquérir les concepts principaux des modeleurs de CAO
- Leur faire acquérir une pratique minimale du logiciel de CAO mécanique Pro-Engineer

Démarche : Conférence introductive à la place de la CAO dans les entreprises manufacturières et aux modeleurs CAO. Formation au logiciel de CAO Pro-Engineer par la modélisation d'un assemblage mécanique imposé, voire choisi par binôme.

Plan de l'intervention :

- La CAO au sens large, au sein des entreprises : prototypage virtuel, travail collaboratif, la capitalisation et partage des données produits et méthodes, les modules CAO concernant les produits (modélisation surfaces, pièces et assemblages, simulation cinématique, dynamique, vibratoire, dimensionnement de structures, conception et simulation robotique, optimisation de produits, cotation, modules de fabrication, etc), les modules CAO concernant les processus (IPAO : gammes de montage, gammes de métrologie, gammes de fabrication, programmation d'un robot, d'une cellule robotisée, d'une ligne de production), évocation des bouclages d'analyse et de la cohérence des hypothèses)
- Les modeleurs CAO : modèles surfaces/solides, modeleurs sous contraintes (paramétrique, variationnel), l'associativité des données, détection des « intentions de conception » du modeleur
- Formation aux notions fondamentales du logiciel de CAO Pro-Engineer :
 - Le mode esquisse 2D
 - Les « formes élémentaires » 3D ou fonctions
 - Les fonctions surfaciques évoluées
 - Les assemblages
 - Les familles de pièces et d'assemblages
 - La simulation cinématique
 - La simulation dynamique multi-corps
 - La mise en plan 2D

7.1.5 Module « Valeur et performance en conception »

Formation en : DEA de Génie des Systèmes Industriels, spécialité : Ingénierie de développement des produits et systèmes

Durée : 20h

Objectifs

- Permettre à l'étudiant d'intégrer toutes les dimensions de la valeur d'un produit ou d'un système : vision sociologique, vision marketing, vision fonctionnelle
- Lui permettre d'appréhender la portée, l'utilité et donc la valeur d'une innovation
- Lui donner des outils pour être capable de structurer une démarche de projet par la valeur du produit
- Lui faire prendre conscience du compromis, au sein d'un projet, entre risques, performances, coûts et délais

Contenu

- Vision sociologique du produit : valeurs des produits dans le temps, image, usages, influences culturelles dans la perception, le produit dans son environnement, veille sociétale
- Marketing de la valeur
- Valeur d'une innovation : valeur d'un brevet, marchés, stratégies d'une protection et d'une valorisation de l'innovation
- Indicateurs de conception
- Les risques produit, les risques projet
- Management par la valeur
- Méthodes de choix d'une meilleure solution

7.2 Présentation du CRIC

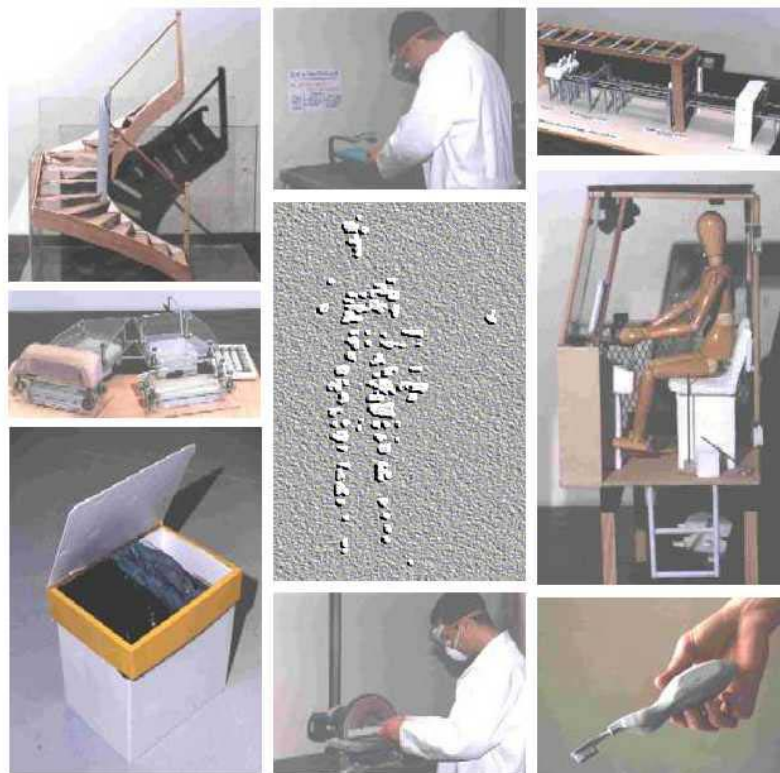


Figure 48 : Exemples de maquettes réalisées au CRIC de l'ECP

En début d'année civile 1999, le projet du CRIC (*Centre de Ressources pour l'Innovation et la Conception*) était lancé à l'ECP. Il s'agissait d'avoir à l'ECP un petit centre de maquetage de produits, au sens large, qui permette à tout étudiant de l'ECP de « concrétiser » et de mettre au point des concepts/produits innovants.

Les quatre objectifs du CRIC sont :

- **Mettre à disposition des étudiants des ressources matérielles et des compétences pour maquetter des produits**
- **Capitaliser les savoirs et savoir-faire générés autour des projets**
- **Développer l'intérêt des étudiants pour l'innovation et la création d'entreprises**
- **Favoriser la collaboration avec les industriels**

Le CRIC a été conçu pour être un centre de « mise au point de concepts de produit et services associés » qui prépare les étudiants à des pratiques modernes en suscitant à travers ces pratiques l'émergence de l'innovation. De ce fait, il a été structurellement découpé en trois parties :

- **Le centre de maquetage** (atelier rassemblant des matériaux, techniques et machines de maquetage rapide)

- **Le serveur de conception** (capitalisation de projets, base de données spécifique de projets CAO, plate-formes intranet de gestion de projets, liens web utiles en conception)
- **Le maquettage virtuel** (pool de logiciels de modélisation et simulation)

Actuellement, les objectifs ont tous été atteints (voir <http://www.pl.ecp.fr/cric/>) et une soixantaine de centraliens effectuent des maquettes de produit chaque année (voir **Figure 48**).

7.3 Charte de la liste de diffusion VAFORE

« Réseau francophone de REcherche sur les disciplines
VAloriques et FOnctionnelles »

Bernard Yannou, *Ecole Centrale Paris*
Jean-Pierre Grandhayé, *ENSGSI – INPL de Nancy*
Jean Michel, *Ecole Nationale des Ponts et Chaussées*

Le 11 mai 1999, à l'initiative de l'AFAV (Association Française pour l'Analyse de la valeur)⁶⁰, avec de nombreux partenaires industriels et universitaires, dans les locaux du CNES, une journée de réflexion et de travail a permis d'aborder la notion de valeur dans un cadre pluridisciplinaire. Cette journée a bien montré la nécessité et l'intérêt de conduire des recherches dans une optique pluridisciplinaire.

7.3.1 Thématique du réseau

L'objet du réseau VAFORE est d'être un moyen d'échanges entre personnes s'intéressant, d'un point de vue recherche et dans la langue française, aux approches fonctionnelles au sens large et/ou aux approches valoriques (i.e. centrées sur les notions de Valeur).

Les approches fonctionnelles sont celles qui mettent en œuvre des modèles de fonctions (ou objectifs ou encore besoins) et induisent des raisonnements, des décisions, des organisations, des stratégies, etc, basées sur ces modèles fonctionnels. On entend par fonction une caractérisation de « ce qui est fait ou de ce qui est à faire », en opposition à « comment cela se fait », tenant compte en outre de contraintes dues aux contextes dans lesquels on se situe. Les raisonnements et structurations fonctionnelles sont particulièrement féconds dans de multiples domaines, notamment lorsqu'il s'agit de susciter l'innovation, d'assurer la qualité ou de maîtriser les coûts. Ils conduisent désormais à l'élaboration et à l'utilisation de cahiers des charges fonctionnels. Ces approches fonctionnelles sont naturellement des modèles de confrontation de points de vue multiples (diverses parties prenantes).

Les approches valoriques sont celles qui tentent d'établir des compromis de type performances/coûts, bénéfiques/risques, opportunités/menaces, ordre/désordre, avantages/inconvénients socio-économiques, multi-points de vue de type local/global, court terme/long terme, fugace/pérenne (durable). Ces relations duales abordées par différentes disciplines, par différentes personnes conduisent à de multiples représentations de la notion de "valeur" qu'il est intéressant de confronter, voire de faire coexister. Le problème de l'appréciation et de la mesure de ces valeurs est également un problème sous-jacent important.

⁶⁰ AFAV, 11 rue de Turbigo, 75002 Paris - Tel : 01 55 80 70 61 - Mail : afav@wanadoo.fr - <http://www.afav.fr>

L'intérêt de raisonner et d'échanger, de manière simultanée, sur ces deux familles d'approches est de permettre d'aboutir à des compromis innovants et optimaux de management, de prise de décisions et de pilotage des actions, ceci de manière raisonnée à partir d'une prise en compte des besoins et contraintes initiales (coûts, délais, ressources, savoir-faire, risques, etc). La recherche des meilleurs compromis possibles amène alors à prendre en considération et optimiser les processus de convergence des points de vue à travers diverses modalités d'organisation du travail, d'échange d'information et de conduite de projet (cf. management par la valeur).

Ces approches sont représentatives de très nombreuses problématiques industrielles, mais aussi publiques et organisationnelles. Elles s'appuient sur un double socle : celui des pratiques vécues et celui des disciplines scientifiques.

Depuis plus de 50 ans, des pratiques telles que, par exemple, celle de l'Analyse Fonctionnelle et celle de l'Analyse de la Valeur ont été développées par des consultants puis par des salariés des entreprises.

Les disciplines scientifiques dont on parle ici sont plus en arrière plan de ces pratiques ; elles en fondent la légitimité, elles les explicitent et les poussent à se repenser. Beaucoup d'indices laissent à penser qu'il est temps de bien asseoir ces pratiques fonctionnelles et de valoriser sur ces disciplines scientifiques que sont : les sciences de la conception, les sciences de la décision, du management, de l'information, du comportement,... qui forment un cadre générique plus large pour observer, comprendre et agir.

Le présent réseau se veut donc très ouvert à des échanges entre pratiques et disciplines scientifiques diverses pour une meilleure fertilisation croisée, la caractéristique étant que ces échanges soient relatifs à un acte de recherche.

Nous entendons par recherche⁶¹ des activités de production de modèles et de traitements d'un niveau générique qui peut souvent s'abstraire d'une discipline. L'objet d'une recherche n'est en aucun cas l'application particulière d'un savoir sur un cas d'étude mais elle concerne bien la production d'un nouveau savoir. La production de ces savoirs devra prendre un certain recul par rapport aux pratiques méthodologiques. On veillera à échanger sur des formalismes suffisamment génériques, c'est-à-dire qui soient relativement indépendants d'un contexte et d'une discipline. Toutefois, on considère également comme recherche l'élaboration de modèles expérientiels à partir de pratiques observées.

7.3.2 Objectifs détaillés

L'intérêt de développer un réseau interdisciplinaire dans ce domaine est largement motivé par les attentes formulées dans les différentes disciplines scientifiques et le manque actuel de représentation dans les instances de pilotage de la recherche. L'objectif principal est donc de participer à la création et à l'animation d'une réelle communauté de recherche qui puisse augmenter en qualité et quantité au cours des années. Il est ouvert aux témoignages et contributions d'horizons différents.

Le réseau VAFORE s'inscrit dans la ligne de promotion des disciplines fonctionnelles et valoriques développée en France depuis plus de 20 ans par l'AFAV

⁶¹ L'AFAV, bien qu'initiatrice de ce réseau en sera également facilitatrice dans la mesure du possible. Elle n'est en aucun cas une institution qui fait elle-même de la recherche, et elle ne pilotera en aucun cas la recherche de ce réseau.

(Association Française pour l'Analyse de la Valeur) qui a pris récemment l'initiative d'une mobilisation active des acteurs de la recherche sur ce terrain.

Dans le détail, le réseau VAFORE a les objectifs suivants :

- Informer, échanger et peut-être collaborer sur des modèles génériques. La pluridisciplinarité est alors un gage de qualité. Dans un esprit de recherche, les modèles exposés peuvent être soumis à la critique et/ou testés par d'autres membres du réseau.
- Regrouper des chercheurs francophones et isolés pour les amener à produire et diffuser des travaux de recherche d'envergure internationale. Ces chercheurs (au sens large : tous ceux qui produisent du savoir nouveau) sont représentatifs des différentes disciplines qui ont un intérêt vis-à-vis des approches fonctionnelles et valoriques, à savoir :
 - Productique/automatique (produits, systèmes de production),
 - Gestion de projets,
 - Gestion du risque,
 - Génie des procédés,
 - Génie Civil,
 - Architecture,
 - Systèmes d'information, de communication et de décision
 - Gestion et économie d'entreprise et d'organisation
 - Marketing
 - Médecine/Pharmacie
 - Sciences de la Terre
 - Sciences cognitives et de l'éducation
 - Sciences politiques et d'aménagement du territoire (notamment ce qui concerne les problèmes de développement durable)
- Privilégier des approches systémiques qui :
 - permettent de développer des modèles multi-vues (ex : vue client),
 - prennent en compte des paramètres de domaines différents,
 - modélisent les aspects fonctionnels (objectifs), structurels (solutions et organisations), comportementaux (processus) et génétiques (évolutifs).
- Définir et organiser des séminaires thématiques, notamment par l'intermédiaire des « Rencontres de l'AFAV ».
- Echanger sur les revues scientifiques susceptibles de publier les travaux de ses membres. Il pourra notamment alimenter une tribune « Recherche » au sein de la revue « La Valeur » éditée par l'AFAV.
- Echanger sur les colloques scientifiques en rapport avec ses thématiques. Il pourra permettre de véhiculer des appels à organisation de séminaires/ateliers dans nos thématiques. Il pourra, par exemple proposer un atelier « recherche » au sein du colloque « Valeur » organisé par l'AFAV.
- Susciter des travaux de recherche et leur financement pour des jeunes chercheurs et susciter intérêts et vocations sur ces problématiques dans les différentes disciplines.
- Susciter des collaborations de recherche, notamment entre universités, entreprises et sociétés de conseil.
- Fonder une communauté de recherche reconnue et référencée qui ait une bonne visibilité externe.

- Pouvoir faire pression sur les bailleurs de fonds institutionnels (bourses, contrats, ..., France, Europe, francophonie,...), les convaincre, pour obtenir des financements dans ce champ de recherche.

7.3.3 Animation du réseau

Le réseau VAFORE et la liste de diffusion associées sont animés par :

- Bernard YANNOU, Ecole Centrale de Paris
- Jean-Pierre GRANDHAYE, ENSGSI Nancy
- Jean MICHEL, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées et Président de l'AFAV.

Les animateurs se réservent le droit de refuser la diffusion de message non conformes à l'objet de la liste et de mettre fin à tout moment à celle-ci. Les messages diffusés n'engagent que leurs auteurs et nullement les animateurs de la liste ou les institutions desquelles ils relèvent.

7.4 Sommaire du numéro Management par la Valeur de la revue RFGI

Nous donnons par la suite le sommaire du numéro spécial d'avril 2001 de la Revue Française de Gestion Industrielle (RFGI) sur le thème du « Management par la Valeur » ; numéro dont nous avons été l'éditeur scientifique.

Notions fondamentales

- Analyse de la valeur et valeur économique des biens et services, Jacques Perrin, INSA de Lyon
- Repères pour un modus vivendi sur la valeur, Philippe Chazelet et François Lhote, Laboratoire d'Automatique de Besançon

Organisation et management des entreprises

- Le management par la valeur, démarche de coaching pour l'accompagnement du changement dans les organisations, Jean Michel, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées
- Le management de la valeur et l'impulsion par les Hommes - Vers une méthodologie robuste, Jean-Pierre Grandhayé, Martine Tani et Claudine Guidat, Laboratoire de Recherche en Génie des Systèmes Industriels, Nancy

Méthodologies d'aide à la décision

- Contribution au management par la valeur en mesurant l'impact des insatisfactions – Témoignage du cas Schneider Electric, Robert Volsy, Ecole Supérieure de Commerce de Grenoble
- Maîtrise des performances et des risques de projet - enseignements d'application de SPEC à des cas industriels, Claude Chevenier, EDF et Bernard Yannou, Ecole Centrale Paris
- Management par la Valeur pour optimiser un budget formation, Olaf de Hemmer, Apte S.A.

Ouverture sur le monde

- Le cheminement de l'analyse de la valeur vers le Value Management au Canada, Francine Constantineau, Valorex inc., Montréal, Canada
- A l'écoute des clients du management par la valeur au Royaume-Uni, Roy M. Woodhead et Clive G. Downs, Oxford Brookes University, Royaume-Uni
- Management par la valeur et développement durable : un apport pour les collectivités locales, Catherine Laval, Apte system et Michel Lochot, FDC

7.5 Publications de type bibliographie – état de l’art

7.5.1 Les méthodes de synthèse en préconception

[9] **Yannou B., Vasiliu A.** (1998), *Chapitre 15.2 : Typologie des approches de synthèse dimensionnelle de systèmes mécaniques. Application aux générateurs de trajectoire*, in *Conception de produits mécaniques : méthodes, modèles et outils*, M. Tollenaere Editor, Hermes, ISBN 2-86601-694-7, p. 348-364.

7.5.2 La préconception de produits en Physique Qualitative

[10] Yannou B. (1997), *Chapitre 10 : Aide à la Conception de Systèmes Physiques*, in *Le raisonnement qualitatif pour les sciences de l'ingénieur*, L. Travé-Massuyès, P. Dague et F. Guerrin Editeurs, Hermes : Paris, ISBN 2-86601-611-4, p. 325-337 et 347-357.

7.5.3 Les modèles fonctions-structure-comportements

[22] Magner-Canet S., Yannou B. (1998), *IfNot: a Function-based Approach for both Proactive and Reactive Integrations of New Productive Technologies.* in *FLAIRS'98: Special Track on Reasoning about Functions, in The Eleventh Florida Artificial Intelligence Research Symposium*, Sanibel Island, Florida (USA), 344-350.

7.5.4 Une méthode privilégiée de modélisation et de résolution en préconception : la Programmation Par Contraintes

[8] Yannou B. (1998), *Chapitre 19 : Les apports de la programmation par contraintes en conception*, in *Conception de produits mécaniques : méthodes, modèles et outils*, M. Tollenaere Editor, Hermes, ISBN 2-86601-694-7, p. 457-486.

7.6 Publications sur travaux de recherche

7.6.1 Synthèse et optimisation dans l'espace des topologies en allocation spatiale

⌘ [3] Medjdoub B., Yannou B. (2000), *Separating Topology and Geometry in Space Planning*. **Computer Aided-Design**, vol. 32(1), january 2000, p. 39-61.

7.6.2 Synthèse dimensionnelle de mécanismes par réseau de neurones

- [[[[2] **Vasiliu A., Yannou B.** (2001), *Dimensional Synthesis of Planar Mechanisms Using Neural Networks: Application to Path Generator Linkages*, **Mechanism and Machine Theory**, vol. 36(2), february 2001, p. 299-310.

7.6.3 Conception collaborative de mécanismes par une approche multi-agents

[6] Chedmail P., Damay T., Yannou B. (1999), *A cooperative approach in mechanism design*, in *Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering'98*, J.-L. Batoz, P. Chedmail, G. Cognet and C. Fortin Editors, Kluwer Academic Publishers: Dordrecht/Boston/London, ISBN 0-7923-6024-9, p. 241-248.

7.6.4 Modèle de simulation et d'optimisation qualitative de concept de mécanisme

[[[[27] **Yannou B., Vasiliu A.** (1995), *Design Platform for Planar Mechanisms Based on a Qualitative Kinematics*. in QR'95: Ninth International Workshop on Qualitative Reasoning about Physical Systems, Amsterdam, 191-200.

7.6.5 Méthode de modélisation des objectifs et de suivi de performances en préconception : SPEC

[[[[32] **Yannou B., Hajsalem S.** (2001), *Comparaison des apports de l'Analyse de la Valeur et de la méthode SPEC sur un cas industriel.* in PRIMECA'2001 : Septième Colloque sur la Conception Mécanique Intégrée, La Plagne, France, 422-432.

7.6.6 Méthode de pondération coopérative d'objectifs : le Tri Croisé de Monté-Carlo

[[[[30] Limayem F., Yannou B. (2001), *Le Tri Croisé de Monté Carlo : une boîte à outils pour l'aide à la décision coopérative*. **Revue de CFAO et Informatique Graphique**, accepté et doit paraître prochainement.

7.6.7 Vers le prototypage virtuel de concept par la modélisation avancée de performances et d'objectifs

- [[[12] **Meckesheimer M., Barton R.R., Limayem F., Yannou B.** (2000), *Metamodeling of Combined Discrete/Continuous Responses*. in *DTM'00: Design Theory and Methodology*, ASME, Baltimore, Paper No. DETC2000/DTM-14573.

7.7 Notre bibliographie

Revue internationale avec comité de lecture

- [1] **Medjdoub B., Yannou B.** (2001), *Dynamic Space Ordering at a Topological Level in Space Planning*. **Artificial Intelligence in Engineering**, vol. 15(1), january 2001, p. 47-60.
- [2] **Vasiliu A., Yannou B.** (2001), *Dimensional Synthesis of Planar Mechanisms Using Neural Networks: Application to Path Generator Linkages*. **Mechanism and Machine Theory**, vol. 36(2), february 2001, p. 299-310.
- [3] **Medjdoub B., Yannou B.** (2000), *Separating Topology and Geometry in Space Planning*. **Computer Aided-Design**, vol. 32(1), january 2000, p. 39-61.
- [4] **MQ&D** : Bourseau P., Bousson K., Dague P., Dormoy J.-L., Evrard J.-M., Guerrin F., Leyval L., Lhomme O., Lucas B., Missier A., Montmain J., Piera N., Rakoto-Ravalontsalama N., Steyer J.P., Tomasena M., Travé-Massuyès L., Vescovi M., Xanthakis S., Yannou B. (1995), *Qualitative Reasoning: A Survey of Techniques and Applications* (B. Yannou: *Chap 4.3. Kinematic Analysis and Spatial Reasoning*). **AI-COM: Artificial Intelligence Communications**, vol. 8(3-4), p. 119-192 (B. Yannou wrote 169-174 and 146-147).

Chapitres d'ouvrage

- [5] **Limayem F., Yannou B.** (1999), *Towards a need satisfaction oriented computer aided design*, in *Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering*, J.-L. Batoz, P. Chedmail, G. Cognet and C. Fortin Editors, Kluwer Academic Publishers: Dordrecht/Boston/London, ISBN 0-7923-6024-9, p. 489-496.
- [6] **Chedmail P., Damay T., Yannou B.** (1999), *A cooperative approach in mechanism design*, in *Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering'98*, J.-L. Batoz, P. Chedmail, G. Cognet and C. Fortin Editors, Kluwer Academic Publishers: Dordrecht/Boston/London, ISBN 0-7923-6024-9, p. 241-248.
- [7] **Yannou B.** (1998), *Chapitre 3 : Analyse de la Valeur*, in *Conception de produits mécaniques : méthodes, modèles et outils*, M. Tollenaere Editor, Hermes, ISBN 2-86601-694-7, p. 77-104.
- [8] **Yannou B.** (1998), *Chapitre 19 : Les apports de la programmation par contraintes en conception*, in *Conception de produits mécaniques : méthodes, modèles et outils*, M. Tollenaere Editor, Hermes, ISBN 2-86601-694-7, p. 457-486.
- [9] **Yannou B., Vasiliu A.** (1998), *Chapitre 15.2 : Typologie des approches de synthèse dimensionnelle de systèmes mécaniques. Application aux générateurs de trajectoire*, in *Conception de produits mécaniques : méthodes, modèles et outils*, M. Tollenaere Editor, Hermes, ISBN 2-86601-694-7, p. 348-364.
- [10] **Yannou B.** (1997), *Chapitre 10 : Aide à la Conception de Systèmes Physiques*, in *Le raisonnement qualitatif pour les sciences de l'ingénieur*, L. Travé-Massuyès, P. Dague et F. Guerrin Editeurs, Hermes : Paris, ISBN 2-86601-611-4, p. 325-337 et 347-357.
- [11] **Paillès N., Yannou B., Bocquet J.-C.** (1997), *Manufacturing Flexibility: a New Evaluation*, in *Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering*, P. Chedmail, J.-C. Bocquet and D. Dornfeld Editors, Kluwer Academic Publishers: Dordrecht/Boston/London, ISBN 0-7923-4739-0, p. 71-80.

Colloques internationaux avec comité de lecture

- [12] **Meckesheimer M., Barton R.R., Limayem F., Yannou B.** (2000), *Metamodeling of Combined Discrete/Continuous Responses*. in *DTM'00: Design Theory and Methodology*, ASME, Baltimore, Paper No. DETC2000/DTM-14573.

- [13] **Bacha R., Yannou B.** (2000), *New Approach for Building an Integrated Information System for Manufacturing Engineering Departments.* in *MIM2000: IFAC Symposium on Manufacturing, Modeling, Management and Supervision*, Patras, Greece.
- [14] **Bacha R., Yannou B.** (2000), *Guideline for Technical Data Integration in Manufacturing Engineering.* in *CE2000 : 7th ISPE International Conference on Concurrent Engineering*, Lyon, France.
- [15] **Bacha R., Yannou B.** (2000), *Structuration des Données Process en vue de la mise en place d'un Système d'Information fédérateur orienté technologie SGDT.* in *IDMME2000 : Third International Conference on Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering*, Montréal.
- [16] **Yannou B., Limayem F.** (2000), *La méthode SPEC : Suivi de Performances en cours de Conception.* in *IDMME2000 : Third International Conference on Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering*, Montréal.
- [17] **Limayem F., Yannou B.** (2000), *A Monte Carlo Approach to Handle Imprecision in Pairwise comparison.* in *IDMME2000 : Third International Conference on Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering*, Montréal.
- [18] **Chedmail P., Damay T., Yannou B.** (1999), *A multi-agent approach in mechanism design.* in *IFTOMM'99: Tenth world congress on the theory of machine and mechanisms*, Oulu, Finland.
- [19] **Barton R.R., Limayem F., Meckesheimer M., Yannou B.** (1999), *Using Metamodels for Modelling Propagation of Design Uncertainties.* in *ICE'99: Fifth International Conference on Concurrent Enterprising*, The Hague, Netherlands, 521-528.
- [20] **Limayem F., Yannou B.** (1998), *Towards a customer-oriented conceptual computer aided design.* in *IDPT'98: Integrated Design and Process Technology*, Berlin, vol.3, 61-67.
- [21] **Chedmail P., Damay T., Yannou B.** (1998), *A cooperative approach for dimensional synthesis of mechanisms.* in *IDPT'98: Integrated Design and Process Technology*, Berlin, vol. 3, 68-73.
- [22] **Magner-Canet S., Yannou B.** (1998), *IfNot: a Function-based Approach for both Proactive and Reactive Integrations of New Productive Technologies.* in *FLAIRS'98: Special Track on Reasoning about Functions, in The Eleventh Florida Artificial Intelligence Research Symposium*, Sanibel Island, Florida (USA), 344-350.
- [23] **Medjdoub B., Yannou B.** (1998), *A topological enumeration heuristics in a constraint-based space layout planning.* in *AID'98 : Artificial Intelligence in Design*, Lisbonne, Portugal, .
- [24] **Vasiliu A., Yannou B.** (1997), *Dimensional Synthesis of Planar Path Generator Linkages Using Neural Networks.* in *NATO Advanced Study Institute (ASI) on Computational Methods in Mechanics*, june 16-28, Varna, Bulgaria, .
- [25] **Medjdoub B., Yannou B.** (1996), *Towards a new generation of architectural CAD softwares.* in *ITCSED-96: International Conference on Information Technology in Civil and Structural Engineering Design*, Glasgow, Scotland, 14-16 august 1996.
- [26] **Medjdoub B., Yannou B.** (1996), *ARCHiPLAN: a New Tool of Conceptual Design in Architecture.* in *IDMME-96 : First International Conference on Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Design*, Nantes, 15-17 avril 1996, France, 205-214.
- [27] **Yannou B., Vasiliu A.** (1995), *Design Platform for Planar Mechanisms Based on a Qualitative Kinematics.* in *QR'95: Ninth International Workshop on Qualitative Reasoning about Physical Systems*, Amsterdam, 191-200.
- [28] **Yannou B.** (1993), *Qualitative Design with Envisionment.* in *QR'93: Seventh International Workshop on Qualitative Reasoning about Physical Systems*, 16-20 may 1993, Orcas Island, WA/USA, 250-259.

- [29] **Yannou B.** (1993), *A Phenomenological Qualitative Design*. in *IJCAI's Workshop on "Engineering Problems for Qualitative Reasoning"*, 29 august 1993, Chambéry, France, 1-9.

Publications scientifiques autres (revues nationales avec comité de lecture, revues techniques avec comité de lecture, colloques nationaux avec comité de lecture, notre thèse)

- [30] **Limayem F., Yannou B.** (2001), *Le Tri Croisé de Monté Carlo : une boîte à outils pour l'aide à la décision coopérative*. **Revue de CFAO et Informatique Graphique, accepté et doit paraître prochainement.**
- [31] **Chevenier C., Yannou B.** (2001), *Maitrise des performances et des risques de projet - Enseignements d'application de SPEC à des cas industriels*. **Revue Française de Gestion Industrielle**, Numéro spécial sur le Management par la Valeur, vol. 2/2001, avril 2001.
- [32] **Yannou B., Hajsalem S.** (2001), *Comparaison des apports de l'Analyse de la Valeur et de la méthode SPEC sur un cas industriel*. in *PRIMECA'2001 : Septième Colloque sur la Conception Mécanique Intégrée*, La Plagne, France, 422-432.
- [33] **Limayem F., Yannou B.** (2000), *La méthode SPEC : une modélisation détaillée du Cahier des Charges Fonctionnel pour un suivi de projet et une maîtrise des risques*. in *Congrès international AFAV 2000 : Les hommes et le management par la valeur*, Paris, 88-97.
- [34] **Yannou B.** (1999), *Proposition de deux nouveaux outils d'aide à la décision en analyse de la valeur, basés sur une définition opérationnelle de la valeur*. **La Valeur**, 81: p. 7-14.
- [35] **Yannou B.** (1999), *Choix des solutions basé sur la valeur des fonctions : application au projet ELECTRE*. **La Valeur**, 82: p. 17-23.
- [36] **Limayem F., Yannou B.** (1997), *Comment quantifier le besoin ?* **La Valeur**, 74: p. 18-22.
- [37] **Vasiliu A., Yannou B.** (1997), *Synthèse dimensionnelle de mécanismes générateurs de trajectoire par réseaux de neurones*. in *PRIMECA'97 : Cinquième Colloque sur la Conception Mécanique Intégrée*, La Plagne, 315-323.
- [38] **Yannou B., Limayem F.** (1997), *Comment apprécier la satisfaction du besoin ?* **La Valeur**, 73: p. 16-21.
- [39] **Yannou B., Vasiliu A., Mekhilef M.** (1995), *Plate-forme de conception de mécanismes plans basée sur une cinématique qualitative*. in *PRIMECA'95 : Quatrième Colloque sur la Conception Mécanique Intégrée*, 3-5 avril 1995, La Plagne, France, 175-183.
- [40] **Yannou B.** (1994), *Aide à la Conception Qualitative de Systèmes Dynamiques*. Thèse de l'Ecole Normale Supérieure de Cachan.

Vulgarisation scientifique

- [41] **Mekhilef M., Yannou B.** (1998), *Conception Intégrée Assistée par Ordinateur*. **Techniques de l'Ingénieur**, Doc BM 5006.

7.8 Bibliographie autre

Toutes les références sont citées dans le corps du document.

- [1] **Adam B.**, (1985), *Animer une étude Analyse de la Valeur*. Entreprise Moderne d'Édition.
- [2] **Adam B.**, (1987), *L'Analyse de la Valeur : stimulant des ressources humaines*. Entreprise Moderne d'Édition.
- [3] **Addanki S., Cremonini R. , Penberthy J.S.**, (1989), *Reasoning About Assumptions in Graphs of Models*. in *IJCAI-89*, , 1432-1438.
- [4] **Addanki S., Cremonini R. , Penberthy J.S.**, (1991), *Graphs of Models*. Artificial Intelligence, vol. : p. 145-177.
- [5] **AFAV**, (1994), *L'Analyse de la Valeur*, ed. Damien G. , Monnin A., Ministère de la coopération.
- [6] **AFAV**, (1996), *Qualité en conception - Rencontre besoin, produit, ressources*, AFNOR.
- [7] **Aggoun A. , Beldiceanu N.**, (1992), *Extending CHIP in order to solve complex scheduling and placement problems*. in *JFPL-92: Journées Francophones de la Programmation Logique*, , .
- [8] **André J.M.**, (1986), *Vers un système d'aide intelligent pour l'aménagement spatial: CADOO*. in *Colloque International d'IA de Marseille*, , .
- [9] **ANSI/EIA-632**, (1998), *Processus for Engineering a System*, ANSI Standard,
- [10] **Aoussat A.**, (1997), *Contribution à la modélisation du processus de conception de produits industriels*. Mémoire d'Habilitation à Diriger les Recherches, ENSAM.
- [11] **Aoussat A. , Le Coq M.**, (1998a), *Chapitre 2 : Méthodes globales de conception de produits*, in *Conception de produits mécaniques : méthodes, modèles et outils*, Tollenare M. Editor, Hermes, vol. ISBN 2-86601-694-7, p. 53-75.
- [12] **Aoussat A. , Le Coq M.**, (1998b), *Chapitre 8 : DFA, Contraintes d'assemblage*, in *Conception de produits mécaniques : méthodes, modèles et outils*, Tollenare M. Editor, Hermes, vol. ISBN 2-86601-694-7, p. 185-200.
- [13] **Apte**, (2000), *La Méthode APTÉ (r) d'AV/AF*, Petrelle.
- [14] **Artobolevski I.**, (1975), *Les mécanismes dans la Technique moderne (5 tomes)*, de Moscou.
- [15] **Auger P.**, (1992), *Hiérarchie et niveaux de complexité*, in *Systémique - Théorie et applications*, Le Gallou F. , Bouchon-Meunier B. Editors, Technique & Documentation, Lavoisier: Paris, vol. , p. 63-69.
- [16] **Barreto J.M.**, (1989), *The Role of Bond Graphs in Qualitative Modelling*. in *IJCAI-89*, , 84-87.
- [17] **Barton R.R.**, (1992), *Metamodels for Simulation Input-Output Relations*. in *Winter Simulation Conference*, , 289-298.
- [18] **Barton R.R., Meckesheimer M. , Simpson T.W.**, (2000a), *Experimental Design Issues for Simultaneous Fitting of Forward and Inverse Metamodels*. in *DETC'00: ASME 2000 Design Engineering Technical Conference*, Baltimore, USA/MA, Paper number DETC2000/DAC-14282.
- [19] **Barton R.R. , Simpson T.**, (2000b), *Impact of Metamodel-Driven Visualization on Design*, National Science Foundation project submission, project accepted for grant, Pennsylvania State University.

- [20] **Bassereau J.-F. , Le Coq M.**, (1995), *La mesure de la perception, un outil pour les designers*. Design recherche, vol. 5.
- [21] **Bellut S.**, (1990), *La compétitivité par la maîtrise des coûts CCO et analyse de la valeur*, AFNOR/Gestion.
- [22] **Bellut S.**, (1995), *Estimer le coût d'un projet*. A savoir, Afnor.
- [23] **Ben Ahmed W.**, (2001), *Polysémie du terme valeur*. Projet de DEA GSI de l'Ecole Centrale Paris,
- [24] **Ben Amara A., Deneux D., Soënen R. , Dogui A.**, (1996), *Pré-dimensionnement en conception fonctionnelle*. Revue de CFAO et d'Informatique Graphique, vol. 11(1-2): p. 133-145.
- [25] **Bernard-Bouissières J.**, (2000), *Aide à l'élaboration du cahier des charges fonctionnel - Pour une meilleure expression du besoin*. Collection AFNOR pratique, Paris, AFNOR.
- [26] **Bhaskar R. , Nigam A.**, (1990), *Qualitative Physics Using Dimensional Analysis*. Artificial Intelligence, vol. 45: p. 73-111.
- [27] **Bland J.A. , Dawson G.P.**, (1991), *Tabu search and design optimization*. Computer Aided Design, vol. 23(3): p. 195-201.
- [28] **Bloch A. , Manceau D.**, (2000), *De l'idée au marché. Marketing et stratégie de l'innovation*, Collection Vital Roux, , Vuibert: Paris.
- [29] **Bocquet J.-C. , Duffau B.**, (1997a), *De la gestion de production à la gestion de conception, l'art du management*. coédité par Les Echos, Financial Times et Village Mondial/Pitman, vol. .
- [30] **Bocquet J.-C., Yannou B. , Bernard A.**, (1997b), *Enseignement de l'ingénierie simultanée de développement d'un produit - Illustration par mini-projet*. in *PRIMECA'97*, La Plagne, .
- [31] **Boender C.G.E., de Graan J.G. , Lootsma F.A.**, (1989), *Multi-criteria decision analysis with fuzzy pairwise comparisons*. Fuzzy Sets and Systems, vol. 29: p. 133 - 143.
- [32] **Bose P. , Rajamoney S.A.**, (1992), *Compositional Model-based Design of Physical Systems*. in *QR'92*, , 56-67.
- [33] **Bose P. , Rajamoney S.A.**, (1993), *Compositional Model-Based Design*. in *IJCAI*, Chambéry, France, 1445-1450.
- [34] **Bourne A., Clément A., Foussier A., Saulais J. , Sicard M.**, (1990), *JADE : un jeu d'outils d'aide à la décision technologique*, in *Outils et applications de l'intelligence artificielle en CFAO*, Yvon Gardan, Hermès, vol. , p. 148-161.
- [35] **Bousson K. , Travé-Massuyès L.**, (1993), *Fuzzy Causal Simulation in Process Engineering*. in *QR'93*, , .
- [36] **Bozzo L.M. , Fenves G.L.**, (1992), *Qualitative Reasoning about Structural Behavior for Conceptual Design*, Report on Research conducted Under Grant BCS-88-96121 from the National Science Foundation, Structural Engineering, Mechanics and Materials, Department of Civil Engineering, University of California at Berkeley.
- [37] **Cantzier O., Mekhilef M. , Bocquet J.-C.**, (1995), *Une mémoire technique pour une gestion des connaissances en conception : contribution à la modélisation des décisions*. in *PRIMECA'95*, La Plagne, .
- [38] **Cauvet C. , Rosenthal-Sabroux C.**, (2001), *Ingénierie des Systèmes d'Information*, Hermès.
- [39] **Cavallucci D. , Lutz P.**, (1998), *TRIZ, une nouvelle approche de résolution des problèmes d'innovation*. International Journal of Design and Innovation Research, vol. 1(1): p. 13-20.
- [40] **Cellier E.**, (1991), *Continuous System Modelling*, Springer Verlag.

- [41] **Chambolle F.**, (1995), *Conception fonctionnelle d'une plaquette d'usinage*, Mémoire de DEA, École Normale Supérieure de Cachan.
- [42] **Chandrasekaran B.**, (1990), *Design Problem Solving: a Task Analysis*. Artificial Intelligence Magazine, vol. .
- [43] **Chandrasekaran B.**, (1994), *Functional Representation and Causal Processes*. Advances in Computers, vol. 38: p. 73-143.
- [44] **Charbonnaud P.**, (1991), *Aide au diagnostic curatif multimodèle et multiraisonnement*. Université Bordeaux 1, France.
- [45] **Charman P.**, (1995), *Gestion des contraintes géométriques pour l'aide à l'aménagement spatial*. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
- [46] **Chazelet P. , Lhote F.**, (2001), *Repères pour un modus vivendi sur la valeur*. RFGI : Revue Française de Gestion Industrielle, Numéro spécial sur le Management par la Valeur, avril 2001, vol. 2/2001.
- [47] **Chedmail P.**, (1998), *Optimization of Multi-DOF Mechanisms*, in *Computational Methods in Mechanical Systems - Mechanism Analysis, Synthesis and Optimization*, Angeles J. , Zakhariiev E. Editors, NATO ASI Series, Series F: Computer and Systems Sciences, Springer, vol. 161, p. 97-129.
- [48] **Chevallier J.**, (2001), *Vous avez dit "spécifier" !! ... Vers l'ingénierie des exigences*. La Valeur, vol. 88(avril 2001): p. 21-25.
- [49] **Chittaro L.**, (1995), *Functional Diagnosis and Prescription of Measurements Using Effort and Flow Variables*. in *IEEE Proc. Control Theory Appl.*, , 420-432.
- [50] **Clancy D.J. , Kuipers B.**, (1993), *Behavior Abstraction for Tractable Simulation*. in *QR'93*, Orcas Island, USA(WA), 57-64.
- [51] **Cocquebert E., Féru F., Chaouch H., Deneux D. , Soenen R.**, (1992), *State of the art and evolution in feature-based modeling*. Revue Internationale de CFAO et d'infographie, vol. 7(2): p. 169-200.
- [52] **Coiera E.W.**, (1989), *Learning Qualitative Models From Example Behaviours*. in *Third Qualitative Physics Workshop*, Stanford, 1-3.
- [53] **Constant D.**, (1996), *Contribution à la spécification d'un modèle fonctionnel de produits pour la conception intégrée de systèmes mécaniques*. Thèse de doctorat de l'Université Joseph Fourier Grenoble.
- [54] **Courtot H.**, (1996), *La prise en compte des risques dans la gestion de projet*. Thèse de de l'Université Paris I,
- [55] **Coyne R.D., Rosenman M.A., Radford A.D., Balachandran M. , Gero J.S.**, (1990), *Knowledge-based design systems*, Addison-Wesley.
- [56] **Cross N.**, (1989), *Engineering Design Methods*, Chichester, John Wiley & Sons.
- [57] **Cui Z., Cohn A.G. , Randell D.A.**, (1992), *Qualitative Simulation Based on a Logic Of Space and Time*. in *QR'92*, , 202-217.
- [58] **Dalle Molle D.**, (1989), *Qualitative Simulation of Dynamic Chemical Processes*. Artificial Intelligence Laboratory, The University of Texas at Austin, USA.
- [59] **Damay T.**, (1999), *Approche multi-agents en environnement virtuel pour la conception de produits*. Thèse de l'Ecole Centrale de Nantes.
- [60] **Damski J.C. , Gero J.G.**, (1996), *A logic-based framework for shape representation*. Computer-Aided Design, vol. 28(3): p. 169-181.
- [61] **Davis E.**, (1987), *Constraint propagation with interval labels*. Artificial Intelligence, vol. 24(3).

- [62] **Davis E.**, (1989), *Order of Magnitude Reasoning in Qualitative Differential Equations*, in *readings in Qualitative Reasoning about Physical Systems*, Weld D.S. , de Kleer J. Editors, Morgan Kaufmann, vol. .
- [63] **De Graan J.G.**, (1980), *Extensions to the multiple criteria analysis of T. L. Saaty*, Report National Institute of Water Supply.
- [64] **de Hemmer O.**, (2001), *Management par la Valeur pour optimiser un budget formation*. RFGI : Revue Française de Gestion Industrielle, Numéro spécial sur le Management par la Valeur, avril 2001, vol. 2/2001.
- [65] **de Kleer J. , Bobrow D.G.**, (1984a), *Qualitative Reasoning with Higher-Order Derivatives*. in *National Conference on AI*, , .
- [66] **de Kleer J. , Brown J.S.**, (1984b), *A Qualitative Physics Based on Confluences*. Artificial Intelligence, vol. 24: p. 7-83.
- [67] **Degirmenciyan I., Foussier A. , Chollet P.**, (1994), *Un conciliateur/coordonateur pour une conception simultanée*. Revue de CFAO et d'informatique graphique, vol. : p. 889-911.
- [68] **Delafollie G.**, (1991), *Analyse de la Valeur*, Hachette Technique.
- [69] **Deshayes P.**, (1996), *The duality environment/teleology in modelling process of conception*. in *CESA'96 Multiconference Computational Engineering in Systems Applications*, Lille, France, 585-589.
- [70] **Dincbas M.**, (1990), *Le langage CHIP*. Génie Logiciel et Systèmes Experts, vol. 19(juin): p. 94-99.
- [71] **Dong W.M. , Wong F.S.**, (1987), *Fuzzy weighted averages and implementation of the extension principle*. Fuzzy Sets and Systems, vol. : p. 183-199.
- [72] **Dorigo M., Maniezzo V. , Colorni A.**, (1996), *The Ant System: Optimization by a Colony of Cooperating Agents*. in *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, , 1-13.
- [73] **Du Verdier F.**, (1993), *Solving geometric constraint satisfaction problems for spatial planning*. in *13th International Joint Conference on Artificial Intelligence : IJCAI'93*, Chambéry, France, .
- [74] **Dupinet E.**, (1991), *Contribution à l'étude d'un système informatique d'aide à la conception de produits mécaniques par la prise en compte des relations fonctionnelles*. Ecole Centrale Paris, France.
- [75] **Duverlié P.**, (1996), *Etude et proposition d'une méthode d'estimation du coût de revient technique appliquée à la production mécanique et basée sur le raisonnement à partir de cas*. Thèse de l'Université de Valenciennes,
- [76] **Dziopa P., Leyval L. , Gentil S.**, (1993), *Qualitative Reasoning for Supervision*. in *IJCAI'93's Workshop on "Engineering Problems for Qualitative Reasoning"*, , .
- [77] **Erdman A.G.**, (1981), *Three and Four Precision Point Kinematic Synthesis of Planar Linkages*. Mechanism and Machine Theory, vol. 16: p. 227-245.
- [78] **Falkenhainer B. , Forbus K.D.**, (1991), *Compositional modeling: finding the right model for the job*. Artificial Intelligence, vol. : p. 95-143.
- [79] **Faltings B.**, (1987), *Qualitative Kinematics in Mechanisms*. in *IJCAI-87*, , 436-442.
- [80] **Faltings B.**, (1992), *A Symbolic Approach to Qualitative Kinematics*. Artificial Intelligence, vol. 56: p. 139-170.
- [81] **Faltings B. , Sun K.**, (1993), *Computer-aided Creative Mechanism Design*. in *IJCAI*, Chambéry, France, 1451-1457.
- [82] **Fauroux J.-C.**, (1999), *Conception optimale de structures cinématiques tridimensionnelles - Application aux mécanismes de transmission en rotation*. Thèse de l'INSA de Toulouse.

- [83] **FD-X-50-101**, *L'analyse fonctionnelle - Outil interdisciplinaire de compétitivité*, Norme AFNOR,
- [84] **FD-X-50-153**, *Analyse de la valeur - Recommendations pour sa mise en oeuvre*, Norme AFNOR,
- [85] **Findeli A.**, (1998), *La recherche en design. Questions épistémologiques et méthodologiques*. International Journal of Design and Innovation Research, vol. 1(1): p. 3-12.
- [86] **Fischer X.**, (2000), *Stratégie de conduite de calcul pour l'aide à la décision en conception mécanique intégrée - Application aux appareils à pression*. Thèse de l'ENSAM,
- [87] **Flemming U.**, (1988), *A generative expert system for the design of building layouts*. Artificial Intelligence in Engineering Design, New-York, Elsevier.
- [88] **Forbus K.D.**, (1984), *Qualitative Process Theory*. Artificial Intelligence, vol. 24: p. 85-168.
- [89] **Forbus K.D.**, (1986), *The Qualitative Process Engine*, Technical report, University of Illinois, Department of Computer Science.
- [90] **Forbus K.D., Nielsen P. , Faltings B.**, (1978), *Qualitative Kinematics : A Framework*. in *IJCAI-87*, , 430-436.
- [91] **Forbus K.D., Nielsen P. , Faltings B.**, (1991), *Qualitative Spatial Reasoning : the Clock Project*. Artificial Intelligence, vol. 51: p. 417-471.
- [92] **Fouché P.**, (1992), *Vers une unification des méthodes de simulation qualitatives*. Thèse de l'Université de Technologie de Compiègne, France.
- [93] **Fouré C.**, (1982), *Une approche chiffrée de la valeur*. La Valeur, vol. 13: p. 24-26.
- [94] **Fox M.S. , Sycara K.**, (1990), *Overview of CORTES: a constraint based approach to production planning, scheduling and control*. in *Fourth International Conference of Expert Systems in Production and Operations Management*, , .
- [95] **Freuder E.C.**, (1978), *Synthesizing constraint expressions*. CACM, vol. 21(11): p. 958-966.
- [96] **Fron A.**, (1994), *Programmation par contraintes*, Addison-Wesley.
- [97] **Garin H.**, (1994), *AMDEC/AMDE/AEEL - L'essentiel de la méthode*. A savoir, Paris, AFNOR.
- [98] **Garro O., Choulier D. , Micaëlli J.-P.**, (2001), *L'émergence, processus clé de la conception inventive : Application à la conception d'une partie d'un robot*. in *PRIMECA'2001 : Septième Colloque sur la Conception Mécanique Intégrée*, La Plagne, France, 412-421.
- [99] **Garro O., Salaü I. , Martin P.**, (1995), *Distributed Design Theory and Methodology*. International Journal of Concurrent Engineering: research and applications, vol. 3(1): p. 43-54.
- [100] **Gero J.S. , Kazakov V.A.**, (1998), *Evolving design genes in space layout planning problems*. Artificial Intelligence in Engineering, vol. 12(3): p. 163-176.
- [101] **Goel A.K., de Silva Garza A.G., Pittges J., Shankar M. , Stroulia E.**, (1993), *Model-based Redesign : Indexing Causal Mechanisms and Qualitative Equations*. in *IJCAI's workshop on "Artificial Intelligence in Design"*, Chambéry, France, 29-35.
- [102] **Gormand C.**, (1995), *Le coût global - Pratique et études de cas*. A savoir, AFNOR.
- [103] **Goyhenetche M.**, (1999), *Marketing de la Valeur*, Paris, INSEP Editions.
- [104] **Grandhaye J.-P., Tani M. , Guidat C.**, (2001), *Le management de la valeur et l'impulsion par les Hommes - Vers une méthodologie robuste*. RFGI : Revue Française de Gestion Industrielle, Numéro spécial sur le Management par la Valeur, avril 2001, vol. 2/2001.
- [105] **Gzara L.**, (2000), *Les patterns pour l'ingénierie des systèmes d'information produit*. Thèse de doctorat de l'Université Joseph Fourier Grenoble.

- [106] **Hansen J.M.**, (1993), *Synthesis of Spatial Mechanisms using Optimization and Continuation Methods*. in *NATO-Advanced Study Institute on Computer Aided Analysis of Rigid and Flexible Mechanical Systems*, Troia, Portugal, 441-453.
- [107] **Hanser J.M.**, (1990), *CFAO et propagation de contraintes, technologie, enjeux et étapes industrielles*. in *MICAD*, Paris, .
- [108] **Harani Y.**, (1997), *Une approche multi-modèles pour la capitalisation des connaissances dans le domaine de la conception*. Thèse de l'INPG,
- [109] **Haroud Djamila, Boulanger S., Gelle E. , Smith I.**, (1995), *Management of conflict for preliminary engineering design tasks*. vol. 9(4).
- [110] **Hartenberg R.S. , Denavit J.**, (1964), *Kinematic Synthesis of Linkages*. series in Mechanical Engineering, McGraw Hill.
- [111] **Herman M.W. , Koczkodaj W.W.**, (1996), *A Monte Carlo study of pairwise comparison*. Information Processing Letters, vol. 57: p. 25-29.
- [112] **Hertkorn P. , Rudolph S.**, (1998), *Exploiting Similarity Theory for Case-Based Reasoning in Real-Valued Engineering Design Problems*. in *AID'98 : Artificial Intelligence in Design*, Lisbonne, Portugal, .
- [113] **Hwang W.-M. , Hwang Y.-W.**, (1992), *Computer-aided structural synthesis of planar kinematic chains with simple joints*. Mechanism and machine theory, vol. 27(2): p. 189-199.
- [114] **Hyvönen E.**, (1992), *Constraint reasoning based on interval arithmetic: the tolerance propagation approach*. Artificial Intelligence, vol. 58: p. 71-112.
- [115] **Jaffar J. , Lassez J.-L.**, (1987), *Constraint Logic Programming*. in *POPL-87: Fourteenth ACM Symposium on Principles of Programming Languages*, Munich, 111-119.
- [116] **Janssen P.**, (1990), *Aide à la conception : une approche basée sur la satisfaction de contraintes*. Université de Montpellier des Sciences et Techniques du Languedoc.
- [117] **Jeantet A.**, (1998), *Les objets intermédiaires de la conception*. Sociologie du travail, vol. 3/98: p. 291-316.
- [118] **Jegou P.**, (1991), *Contribution à l'étude des problèmes de satisfaction de contraintes : Algorithmes de propagation et de résolution. Propagation de contraintes dans les réseaux dynamiques*. Thèse de doctorat, Université de Montpellier II.
- [119] **Joskowicz L.**, (1987), *Shape and Function in Mechanical Devices*. in *AAAI-87*, , 611-615.
- [120] **Joskowicz L.**, (1989a), *Reasoning about the kinematics of mechanical devices*. Artificial Intelligence in Engineering, vol. 4(1): p. 22-31.
- [121] **Joskowicz L.**, (1989b), *Simplification and Abstraction of Kinematic Behaviors*. in *IJCAI-89*, , 1337-1342.
- [122] **Joskowicz L. , Addanki S.**, (1988), *From Kinematics to Shape : An Approach to Innovative Design*. in *Seventh National Conference on Artificial Intelligence*, St Paul, Minnesota, USA, 347-352.
- [123] **Joskowicz L. , Sacks E.**, (1993), *Automated modeling and kinematic simulation of mechanisms*. Computer Aided Design, vol. 25(2): p. 106-118.
- [124] **Joskowicz L. , Sacks E.P.**, (1991), *Computational Kinematics*. Artificial Intelligence, vol. 51: p. 381-416.
- [125] **Jouineau C.**, (1985), *L'analyse de la valeur, méthodes, mise en oeuvre et applications*. Entreprise Moderne d'Édition.
- [126] **Jung J.-P.**, (1994), *Un nouveau modèle pour la représentation de contraintes complexes en CAO*. Revue Internationale de CFAO et d'infographie, vol. 9(1-2): p. 9-23.
- [127] **Kim H.-K.**, (1991), *Qualitative Kinematics of Linkages*, in *Qualitative Physics*, Struss P. , Faltings B. Editors, , vol. .

- [128] **Kim H.M., Michelena N.F., Jiang T. , Papalambros P.Y.**, (2000), *Target Cascading in Optimal System Design*. in *DETC'00: ASME 2000 Design Engineering Technical Conference*, Baltimore, USA/MA, Paper number DETC2000/DAC-14265.
- [129] **Knight T.W.**, (1988), *Designing a Shape Grammar: Problems of Predictability*. in *AID'98: Artificial Intelligence in Design*, , .
- [130] **Kolodner J.L.**, (1992), *An Introduction to Case-Based Reasoning*. Artificial Intelligence Review, vol. 6: p. 3-34.
- [131] **Kramer S. , Sandor G.**, (1975), *Selective precision synthesis - a general method of optimization for planar mechanisms*. ASME Journal of Engineering in Industry, vol. 97(2): p. 689-701.
- [132] **Krishnamurty S. , Turcic D., A.**, (1992), *Optimal Synthesis of Mechanisms using Nonlinear Goal Programming Techniques*. vol. 27(5): p. 599-612.
- [133] **Kuipers B.J.**, (1986), *Qualitative Simulation*. Artificial Intelligence, vol. 29: p. 289-338.
- [134] **Kuipers B.J.**, (1987), *Abstraction by Time-Scale in Qualitative Simulation*. in *AAAI_87*, , 621-625.
- [135] **Kuipers B.J., Chiu C., Dalle Molle D.T. , Throop D.R.**, (1991), *Higher-Order Derivative Constraints in Qualitative Simulation*. Artificial Intelligence, vol. 51: p. 343-379.
- [136] **Laval C.**, (1999), *Anticiper les risques à chaque étape de la conception*. in *AFITEP 99*, Paris, .
- [137] **Laval C. , Le Cam J.**, (1998), *Analyse Fonctionnelle et Maîtrise des risques - Méthodologie d'aide à la décision pour la maintenance des ouvrages d'art d'un système ferroviaire*. in *Congrès AFAV 98*, Paris, .
- [138] **Laval C. , Lochot M.**, (2001), *Management par la valeur et développement durable : un apport pour les collectivités locales*. RFGI : Revue Française de Gestion Industrielle, Numéro spécial sur le Management par la Valeur, avril 2001, vol. 2/2001.
- [139] **Law W.S. , Antonsson E.K.**, (1995), *Hierarchical Imprecise Design with Weights*. in *Fourth IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE/IFES'95)*, , .
- [140] **Law W.S. , Antonsson E.K.**, (1996), *Multi-Dimensional Mapping of Design Imprecision*. in *ASME Design Engineering Technical Conference*, Irvine, California, Paper number 96-DETC/DTM-1524.
- [141] **Le Bissonnais J.**, (1997), *Conduite de projets - Le management des risques*. A savoir, AFNOR.
- [142] **Le Gallou F.**, (1992), *Décomposition des systèmes*, in *Systémique - Théorie et applications*, Le Gallou F. , Bouchon-Meunier B. Editors, Technique & Documentation, Lavoisier: Paris, vol. , p. 91-99.
- [143] **Le Moigne J.-L.**, (1990), *La théorie du système général - Théorie de la modélisation (3ème édition)*. Collection Systèmes-Décisions, Section : Systèmes de Gestion, Paris, Presses Universitaires de France.
- [144] **L'Eglise T., De Lit P., Danloy J., Rekiek B. , Delchambre A.**, (2000), *A multi-criteria decision-aid method for material handling equipment selection*. in *IDMME2000 : Third International Conference on Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering*, Montréal, .
- [145] **Lin Y., Krishnapur K., Allen J.K. , Mistree F.**, (2000), *Robust Concept Exploration in Engineering Design: Metamodeling Techniques and Goal Formulations*. in *DETC'00: ASME 2000 Design Engineering Technical Conference*, Baltimore, USA/MA, Paper number DETC2000/DAC-14283.
- [146] **Lootsma F.A.**, (1982), *Performance evaluation of nonlinear optimization methods via multi-criteria decision analysis and via linear model analysis*. M.J.D. Powell ed. Nonlinear Optimization 1981, ed. Press A. Vol. 1, London. 419-453.

- [147] **Lottaz C., Sam-Haroud D., Faltings B.V., Smith I.**, (1998), *Constraint Techniques for Collaborative Design*. in *IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence*, , .
- [148] **Lucas B.**, (1994), *Méthode d'aide à la modélisation par graphes de liaison et utilisation pour le diagnostic qualitatif de systèmes physiques*. Université Paris XI - Orsay.
- [149] **Maculet R.**, (1991), *Représentation des connaissances spatiales (algèbre de Manhattan) et raisonnement spatial avec contraintes*. Paris 6.
- [150] **Macworth A.**, (1977), *Consistency on networks of relations*. *Artificial Intelligence*, vol. 8: p. 99-118.
- [151] **Malmqvist J.**, (1995), *A Computer-Based Approach Towards Including Design History Information in Product Models and Functions-Means Trees*. in *ASME 1995 - Design Engineering Technical Conferences*, , 593-602.
- [152] **Marle F., Bocquet J.-C.**, (2001), *Une approche multi projet pour le management des projets distribués*. in *PRIMECA'2001 : Septième Colloque sur la Conception Mécanique Intégrée*, La Plagne, France, 404-411.
- [153] **Martin C., Djeapragache, Bocquet J.-C.**, (2000), *Amélioration de la gestion du processus de conception à travers les méthodes dans le cadre de la conception Intégrée*. *European Journal of Automation*, vol. 34(avril 2000): p. 237-246.
- [154] **McGarva J.**, (1994), *Rapid search and selection of path generating mechanisms from a library*. *Mechanism and Machine Theory*, vol. 29(2): p. 223-235.
- [155] **McGarva J., Mullineux G.**, (1993), *Harmonic representation of closed curves*. *Applied Mathematical Modelling*, vol. 17: p. 213-218.
- [156] **Medjdoub B.**, (1996), *Méthode de conception fonctionnelle en architecture : une approche CAO basée sur les contraintes : ARCHIPLAN*. Thèse de l'Ecole Centrale Paris.
- [157] **Michel J.**, (2001), *Le management par la valeur, démarche de coaching pour l'accompagnement du changement dans les organisations*. *RFGI : Revue Française de Gestion Industrielle*, Numéro spécial sur le Management par la Valeur, avril 2001, vol. 2/2001.
- [158] **Midler C.**, (1998), *L'auto qui n'existait pas*. 2ème édition ed, Dunod.
- [159] **Missier A.**, (1991), *Structures Mathématiques pour le Calcul Qualitatif, Contribution à la Simulation Qualitative*. LAAS/CNRS, France.
- [160] **Montanari U.**, (1974), *Networks of constraints: fundamental properties and applications to picture processing*. *Information Sciences*, vol. 7: p. 95-132.
- [161] **Montanari U., Rossi**, (1989), *Fundamental properties of networks of constraints: a new formulation*, , ed. Kumar K.a., , Springer-Verlag.
- [162] **Navichandran D., Sycara K.P., Narasimhan S.**, (1991), *A Transformational Approach to Case-Based Synthesis*. *AI EDAM*, vol. 5(1): p. 31-45.
- [163] **Neville D., Joscowicz L.**, (1992), *A Representation Language for Conceptual Mechanism Design*. in *QR'92*, , 96-108.
- [164] **NF-EN-1325-1**, *Vocabulaire du Management de La Valeur, de l'Analyse de la Valeur, de l'Analyse Fonctionnelle*, Norme AFNOR,
- [165] **NF-X-50-100**, *Analyse fonctionnelle - Caractéristiques fondamentales*, Norme AFNOR,
- [166] **NF-X-50-152**, *Analyse de la valeur - Caractéristiques fondamentales*, Norme AFNOR,
- [167] **O.F.T.A.**, (1994), *Logique floue*, Paris, Masson.
- [168] **Orel T., Trousse B.**, (1995), *A View on the "Philosophical" meanings of the concept of Design*. *Journal of Design Sciences and Technology*, vol. 4(1).
- [169] **Otto K., Antonsson E.**, (1993), *The Method of Imprecision Compared to Utility Theory for Design Selection Problems*. in *ASME/DTM '93: Design Theory and Methodology*, , 167--173.

- [170] **Pahl G. , Beitz W.**, (1984), *Engineering Design*. The Design Council, London, Springer.
- [171] **Pailès N.**, (1999), *Approche globale d'aide à la décision d'investissements dans une stratégie de flexibilité pour les projets industriels : Application à l'automobile (O.D.I.S.A.I.)*. Thèse de l'Ecole Centrale Paris.
- [172] **Perrin J.**, (1995), *Analyse économique des activités de conception*. in *Université d'été - Pôle Productique Rhône-Alpes*, , .
- [173] **Perrin J.**, (2001a), *Analyse de la valeur et valeur économique des biens et services*. RFGI : Revue Française de Gestion Industrielle, Numéro spécial sur le Management par la Valeur, avril 2001, vol. 2/2001.
- [174] **Perrin J.**, (2001b), *Concevoir l'innovation industrielle - Méthodologie de conception de l'innovation*, CNRS Editions.
- [175] **Porter M.**, (1986), *L'avantage concurrentiel : comment devancer ses concurrents et maintenir son avance*, Paris, Interéditions.
- [176] **Quarante D.**, (2001), *Eléments de design industriel (3ème édition)*.
- [177] **Raiman O.**, (1991), *Order of magnitude reasoning*. Artificial Intelligence, vol. 51: p. 11-38.
- [178] **Rak I., Teixido C., Favier J. , Cazenaud M.**, (1990), *La démarche de projet industriel*. Approches systèmes, Foucher.
- [179] **Regis Vescovi M.**, (1991), *La Représentation des Connaissances et le Raisonnement sur les Systèmes Physiques*. Université de Savoie, LIA.
- [180] **Roozenburgh N.F. , Eekels J.**, (1995), *Product Design: Fundamentals and Methods*, Chichester, John Wiley & Sons.
- [181] **Roy B.**, (1985), *Méthodologie multicritère d'aide à la décision*, SERIE : Production et techniques quantitatives appliquées à la gestion, ed. Gestion C., , Economica.
- [182] **Saaty T.L.**, (1977), *A scaling method for priorities in hierarchical structures*. Journal of Mathematical Psychology, vol. 15(3): p. 234-281.
- [183] **Sacks E.**, (1992), *Model-Based Kinematic Simulation*. in *QR'92*, , 109-120.
- [184] **Sadeh N.**, (1991), *Look-ahead techniques for Micro-opportunistic job-shop scheduling*. PhD of School of Computer Science, Carnegie Mellon University.
- [185] **Saint Paul L.**, (1992), *Eléments de cybernétique*, in *Systémique - Théorie et applications*, Le Gallou F. , Bouchon-Meunier B. Editors, Technique & Documentation, Lavoisier: Paris, vol. , p. 25-45.
- [186] **Sardain P.**, (1993), *Contribution à la Synthèse de Mécanismes. Un environnement CAO pour la synthèse topologique et dimensionnelle de générateurs de mouvement*. Thèse de Mécanique, Université de Poitiers.
- [187] **Sardain P.**, (1994), *Un environnement CAO pour la synthèse de mécanismes articulés*. vol. 9(1-2): p. 135-154.
- [188] **Savransky S.D.**, (2000), *Engineering of creativity - Introduction to TRIZ Methodology of Inventive Problem Solving*, CRC Press.
- [189] **Schwarz A., Berry D.M. , Shaviv E.**, (1994), *On the use of the automated building design system*. Computer Aided Design, vol. 26(10): p. 747-762.
- [190] **Scott M.**, (1999), *Formalizing Negotiation in Engineering Design*. PhD thesis, California Institute of Technology, Pasadena, CA,
- [191] **Sellini F.**, (1999), *Contribution à la représentation et à la vérification de modèles de connaissances produit en ingénierie d'ensembles mécaniques*. Thèse de l'Ecole Centrale Paris.

- [192] **Shen W., Barthes J.-P. , El Dashan K.**, (1994), *Propagation de contraintes dans les systèmes de CAO en mécanique*. Revue Internationale de CFAO et d'infographie, vol. 9(1-2): p. 25-40.
- [193] **Shrobe H.E.**, (1993), *Understanding Linkages*. in *Seventh International Workshop on Qualitative Reasoning about Physical Systems : QR-93*, Orcas Island, WA/USA, 212-218.
- [194] **Simon H.A.**, (1977), *Models of Discovery - and Other Topics in the Methods of Science*. Boston Studies in the Philosophy of Science. Vol. LIV, Dordrecht, Holland, D. Reidel Publishing Company.
- [195] **Simon H.A.**, (1991), *Science des systèmes - Sciences de l'artificiel*. Afcet Systèmes, Paris, Dunod.
- [196] **Sridhar N., Agrawal R. , Kinzel G.**, (1996), *Algorithms for the structural diagnosis and decomposition of sparse, underconstrained design systems*. Computer-Aided Design, vol. 28(4): p. 237-249.
- [197] **Stal-Le Cardinal J., Mekhilef M. , Bocquet J.-C.**, (1999), *A systemic decision approach for capitalizing dysfunctions in design processes*. in *ASME/DETC : Design Engineering Technical Conference*, Las Vegas, USA, .
- [198] **Subramanian D. , Wang C.-S.**, (1993), *Kinematic Synthesis with Configuration Spaces*. in *QR'93*, Orcas Island, WA/USA, 228-239.
- [199] **Suh N.**, (1993), *The Principles of Design*, Oxford, Oxford University Press.
- [200] **Suh N.P.**, (1990), *The principles of design*. Transactions of the ASME, Special 50th Anniversary Design Issue, vol. : p. 2-10.
- [201] **Suh N.P.**, (1995), *Axiomatic design of mechanical systems*. Transactions of the ASME, Special 50th Anniversary Design Issue, vol. 117(3): p. 2-10.
- [202] **Suh N.P., Bell A.C. , C. G.D.**, (1978), *On an Axiomatic Approach to Manufacturing and Manufacturing Systems*. Journal of Engineering for Industry, vol. : p. 127-130.
- [203] **Sun K.**, (1994), *Computer-Aided Creative Mechanism Design*. PhD, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- [204] **Suwa M., Gero J. , Purcell T.**, (1998), *Analysis of Cognitive Processes of a Designer as a Foundation for Support Tools*. in *AID'98 : Artificial Intelligence in Design*, Lisbonne, Portugal, .
- [205] **Tassinari R.**, (1985), *Le rapport qualité/prix*, Paris, Les éditions d'organisation.
- [206] **Teixido C.**, (1995), *Numéro spécial "Analyse de la Valeur"*. Revue Technologie, vol. 74.
- [207] **Teixido C. , Dardy**, (1995), *La compétitivité industrielle, Tome 1 : Démarche de conception*. Collection "Plein pot", Foucher.
- [208] **Thurston D.L.**, (1991), *A formal method for subjective design evaluation with multiple attributes*. Research in engineering Design, vol. 3: p. 105-122.
- [209] **Thurston D.L. , Liu T.**, (1991), *Design Evaluation of Multiple Attributes Under Uncertainties*. International Journal of Systems Automation - Research and Application (SARA), vol. 1: p. 143-159.
- [210] **Tollenaere M.**, (1995), *Contribution à la modélisation de connaissances pour la conception mécanique*. Mémoire d'habilitation à diriger les recherches, Université Joseph Fourier, Grenoble 1.
- [211] **Tomiyama T., Umeda Y. , Yoshikawa H.**, (1993), *A CAD for functional design*. vol. 42(1): p. 143-146.
- [212] **Top J.L.**, (1993), *Conceptual Modelling of Physical Systems*. University of Twente, Netherlands.
- [213] **Trousse B.**, (1993), *Using AI in complex system design: implications on building ICAD tools*. Revue de CFAO et d'infographie - numéro spécial AI/CAD 2ème partie, vol. 8(3).

- [214] **Troussier N.**, (1999), *Contribution à l'intégration du calcul mécanique en conception de produits techniques : proposition pour l'utilisation et la réutilisation*. Thèse de doctorat de l'Université Joseph Fourier Grenoble.
- [215] **Ullman D.G.**, (1992), *The Mechanical Design Process*, New York, McGraw Hill.
- [216] **Umeda Y., Ishii M., Yoshioka M., Shimomura Y. , Tomiyama T.**, (1996), *Supporting Conceptual Design Based on the Function-Behavior-State Modeler*. Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing, vol. 10: p. 275-288.
- [217] **Van Dorp J.R. , Duffey M.R.**, (1999), *Statistical Dependence in Risk Analysis for Project Networks Using Monte Carlo Methods*. International Journal of Production economics, vol. 58: p. 17-29.
- [218] **Van Laarhoven P.J.M. , Pedrycz W.**, (1983), *A fuzzy extension of Saaty's priority theory*. Fuzzy sets and systems, vol. 11: p. 229-241.
- [219] **Vargas C.**, (1995), *Modélisation du processus de conception en ingénierie des systèmes mécaniques. Mise en oeuvre basée sur le propagation de contraintes. Application à la conception d'une culasse automobile*. Ecole Normale Supérieure de Cachan.
- [220] **Vasiliu A.**, (1993), *A Topological Graph Unfolding Algorithm for a High-Level Mechanism Model*. in *COMES 1993 : First International Workshop on Mechanism Design and Analysis*, Clermont-Ferrand, France, 73-76.
- [221] **Vasiliu A.**, (1997), *Une approche CAO pour la préconception des mécanismes plans générateurs de trajectoire : RéalisMe*. Thèse de l'Ecole Centrale Paris.
- [222] **Vigier M.**, (1992), *La pratique du QFD*. La petite encyclopédie de la qualité, Les éditions d'organisation.
- [223] **Vittecoq E., Bernard A., Bocquet J.-C. , Yannou B.**, (1993), *Un projet pédagogique de mousqueton : la conception intégrée de l'idée au produit*. in *Troisième Colloque PRIMECA*, École Centrale Paris, Châtenay-Malabry, 171-173.
- [224] **Volsy R.**, (2001), *Contribution au management par la valeur en mesurant l'impact des insatisfactions - Témoignage du cas Schneider Electric*. RFGI : Revue Française de Gestion Industrielle, Numéro spécial sur le Management par la Valeur, avril 2001, vol. 2/2001.
- [225] **Waltz D.**, (1972), *Generating semantic descriptions from drawings of scenes with shadows*, MIT, Massachusetts.
- [226] **Weld D.**, (1992a), *Reasoning about model accuracy*. Artificial Intelligence, vol. .
- [227] **Weld D.S.**, (1992b), *Automatic Selection of Bounding Abstractions*. in *QR-92: Sixth International Workshop on Qualitative Reasoning about Physical Systems*, , 36-43.
- [228] **Williams B.C.**, (1990), *Interaction-based Invention : Designing Novel Devices from First Principles*. in *AAAI-90*, , 349-356.
- [229] **Williams B.C.**, (1991), *A theory of interactions : unifying qualitative and quantitative algebraic reasoning*. Artificial Intelligence, vol. 51: p. 39-94.
- [230] **Wood K., Otto K. , Antonsson E.**, (1992), *Engineering Design Calculations with Fuzzy Parameters*. Fuzzy Sets and Systems, vol. 52(1): p. 1-20.
- [231] **Wood K.L., Antonsson E.K. , Beck J.L.**, (1989a), *Comparing fuzzy and probability calculus for representing imprecision in preliminary engineering design*. in *Design Theory and Methodology*, Montreal, 99-105.
- [232] **Wood K.L., Antonsson E.K. , Beck J.L.**, (1989b), *Computations with imprecise parameters in engineering design: background and theory*. ASME Journal of Mechanisms, Transmissions and Automation in Design, vol. (March 1989).
- [233] **Wright J.F. , Canal C.**, (1996), *CMT - An Innovative System for Project Management*. in *IPMA'96: World Congress on Project Management*, Paris, France, 441-450.

[234] **Yoshimura M. , Nomura R.**, (2000), *Optimization of Machine System Designs based on Decomposition and Hierarchical Ordering of Criteria and Design Variables.* in *DETC'00: ASME 2000 Design Engineering Technical Conference*, Baltimore, USA/MA, Paper number DETC2000/DAC-14520.

[235] **Yvars P.-A.**, (2001), *Contribution à la représentation des connaissances en ingénierie intégrée de produits et de systèmes automatisés de production.* Habilitation à Diriger des Recherches de l'INPG,

Résumé

Nos travaux concernent la conception de produits dans les phases préliminaires, ou *préconception de produits*, se trouvant dans la littérature sous l'expression de *conceptual design*, à la croisée entre les domaines de l'Intelligence Artificielle appliquée à la conception, la conception intégrée et simultanée, les théories de la conception et les méthodologies industrielles du type Analyse de la Valeur.

Dans un premier temps, nous avons proposé des modèles enrichis de cahier des charges. Il s'agit de modèles fonctionnels d'objectifs et de satisfactions (ou préférences) relatifs à un produit, à ses services associés et à son projet de conception-industrialisation, en tachant de tenir compte des aspects : incertitude, contexte, multi-acteurs et évolution.

Dans un deuxième temps, nous avons travaillé à la façon de traduire ces objectifs de produit en concepts de solutions (ou architectures) de manière la plus automatisée qui soit : par des méthodes de synthèse, ou par des méthodes semi-automatiques qui, loin de prendre la place des concepteurs, leur permettent au contraire de disposer d'outils de conception génériques leur donnant les moyens de se consacrer à des tâches de créativité. Nous avons notamment contribué à développer une méthode de synthèse de concepts en allocation spatiale (technique de programmation par contraintes) et des méthodes de synthèse de concepts de mécanisme plan (techniques de réseau de neurones, de multi-agents, de conception basée sur les cas).

Dans un troisième temps, lorsque des concepts ont été proposés, il faut savoir évaluer leurs performances, la difficulté résidant d'une part dans la définition grossière d'un concept et donc dans leur aptitude à représenter des classes entières de produits solutions, et d'autre part dans l'absence de conception de détail. Le raisonnement à partir de modèles incomplètement définis occupe une part importante de nos travaux. Des méthodes issues de la physique qualitative ont été développées, et la modélisation des performances a été abordée de manière probabiliste et floue ainsi que de manière approximée par des techniques de métamodélisation.

Enfin, nous avons abordé la mesure de l'adéquation des performances d'un concept avec le cahier des charges, pour un produit générique, de manière à développer des fonctionnalités de suivi des performances, des coûts et des risques dans la phase de préconception, ainsi que des fonctionnalités d'aide à la reconception et à l'optimisation des concepts (méthodes basées sur la physique qualitative ou sur une simulation de type Monté-Carlo).