



HABILITATION À DIRIGER DES RECHERCHES

Présentée à

L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE TOULOUSE

Spécialité : Systèmes Industriels

par

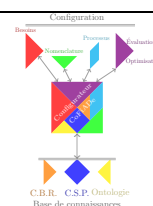
Élise Vareilles

Maître-Assistant au Centre Génie Industriel de l'École des Mines d'Albi-Carmaux

Utilisateur



Configuration interactive et Contraintes : Connaissances, Filtrage et Extensions



Soutenue le **24 novembre 2015** devant le jury composé de :

MM.	Emmanuel Caillaud	Professeur, Université de Strasbourg	Rapporteur
	Bernard Penz	Professeur, Grenoble INP	Rapporteur
	Gilles Trombettoni	Professeur, Université de Montpellier	Rapporteur
Mme	Hélène Fargier	Directrice de recherche, Université de Toulouse 3	Examinatrice
MM.	Michel Aldanondo	Professeur, École Nationale Supérieure des Mines d'Albi-Carmaux	Examineur
	Jean-Marc Astesana	Ingénieur, Renault	Examineur
	Narendra Jussien	Professeur, Directeur de Télécom Lille	Président
	Laurent Geneste	Professeur, École Nationale d'Ingénieur de Tarbes	Correspondant

HDR préparée au Centre Génie Industriel de l'École Nationale Supérieure des Mines d'Albi-Carmaux



À mes deux Vikings
Armand et Marceau
Med al min kærlighed

Remerciements

Ce mémoire est le fruit de dix années de travail menées en tant que maître-assistant à l'École Nationale Supérieure des Mines d'Albi-Carmaux et résulte de nombreuses collaborations nationales et internationales.

Je souhaite, en premier lieu, remercier mes collègues de tous les jours : Michel Aldanondo et Paul Gaborit. MERCI !!! Merci de m'avoir aidée à m'épanouir professionnellement en m'accompagnant depuis le début de ma carrière scientifique. C'est un réel plaisir de travailler avec vous chaque jour, de faire tourner à plein régime nos petites cellules grises sur des problèmes scientifiques et d'appliquer le résultat de nos cogitations à des problèmes concrets. Je n'oublie pas Paul Pitiot, qui a rejoint notre équipe il y a quelques années, avec qui je joue les apprenties sorcières en mixant allégrement la « génétique » et les contraintes.

Je remercie également l'ensemble de mes doctorants. Celle et ceux qui ont soutenus : Mériem Djefel (2010), Joël Abeille (2011) et Aurélien Codet de Boisse (2013). Merci à chacune et chacun d'entre vous de votre implication dans notre travail de recherche. Il n'a pas toujours été facile de travailler ensemble, surtout dans les phases de rédaction, mais le résultat est là ! Vos travaux dessinent un beau tangram, constitué de chacune de vos contributions, qu'il faut maintenant continuer à faire vivre. Et ceux qui prennent la relève : Andrés Felipe Barco Santa (2016 - *Si la vida es un largo viaje, cada viaje es un poco de vida. Muchas gracias por compartir un poco conmigo !*), Luis Ignacio Garcés Monge (2018 - *Una nueva thesis entre dos continentes, llena de hermosos viajes en perspectiva !*) et Abdourahim Sylla (2018 - « La confiance en soi est le premier secret du succès. », R.W. Emerson), à vous de jouer avec ces différentes pièces pour résoudre vos propres casse-têtes scientifiques.

Je souhaite remercier l'ensemble des membres de mon jury pour le regard critique et les remarques pertinentes portés sur mon travail : M. Narendra Jussien qui m'a fait l'honneur de présider mon jury d'habilitation, MM. Bernard Penz, Emmanuel Caillaud et Gilles Trombettoni qui, de part leurs rapports, me permettent d'aborder sereinement ce nouveau virage professionnel armée de leurs conseils et de leur bienveillance, Mme Hélène Fargier, examinatrice, qui m'a conforté dans mes choix scientifiques et ouvert de nouvelles perspectives de recherche, M. Jean-Marc Astesana qui a apporté un regard industriel, attentif et curieux sur mes recherches et M. Laurent Geneste, mon correspondant INP. Laurent, les mots me manquent pour exprimer toute la gratitude et l'estime que j'ai pour toi...

Je tiens également à remercier l'ensemble des chercheurs avec qui j'ai collaboré et plus particulièrement, M. Thierry Coudert avec qui j'ai découvert toutes les nombreuses facettes du co-encadrement de doctorants ☺, M. Christian Thuesen *tak min ven for sin varme velkomst*, Mme. Christine Boher, à qui je transmets avec un plaisir non dissimulé le flambeau HdR pour 2016 et l'ensemble de mes collègues du CGI de l'école des Mines d'Albi-Carmaux : Isabelle, Jacques,

Sébastien T., Matthieu, Nico, Sebastien R., Franck, François, Didier, Lionel, Daouda. Merci à tous de créer cette ambiance de travail exceptionnelle où rigueur et excellence scientifiques côtoient sans interférence qualités humaines, bonne humeur et esprit critique. Un *special thanks to* Fred : merci de tes bons conseils, de ton « coaching » d'avant et d'après match, et de ta disponibilité à mon égard. Bref, on est bien au CGI !!!

Je terminerai par ceux qui me suivent et me soutiennent sans relâche : les bons copains et la famille. Merci à Franck, Matthieu et Estelle pour avoir toujours été là, dans les bons moments comme dans ceux plus difficiles. Merci à Julien de me faire connaître les joies d'être *Marraine* ☺. Merci à mes parents, Nelly et Thierry, qui ont su accompagner la petite fille curieuse et espiègle que j'étais, vers la chercheuse que je suis aujourd'hui. Merci à vous deux de votre patience, de votre ouverture d'esprit et d'avoir su cultiver ma fibre scientifique. Merci à l'homme de ma vie, Fabrice. Merci de partager ma vie, merci de ton soutien inconditionnel, merci de ton amour, merci pour tout... Merci à nos enfants, Armand et Marceau, qui font joyeusement tourbillonner notre vie et nous emmènent là où nous n'aurions jamais songé aller. Je vous aime.

Table des matières

I Curriculum Vitae et Synthèses des activités scientifiques et pédagogiques	1
II Bibliographie personnelle	13
III Activités de recherche et Perspectives	21
1 Introduction	23
2 Contexte et problématiques	29
2.1 Conception et configuration	29
2.2 Configuration Interactive : Définitions et Extensions	30
2.3 Modèle de connaissances et Contraintes	32
2.4 Configureurs et Besoins utilisateurs	33
2.5 Positionnement de nos travaux	35
3 Formalisation des Connaissances et Contraintes	37
3.1 Problèmes de satisfaction de contraintes	38
3.1.1 Définition d'un <i>CSP</i>	38
3.1.2 Variables et Contraintes	39
3.1.3 Classification des <i>CSP</i>	39
3.2 Apports et Contributions Scientifiques	41
3.2.1 Configuration et <i>CSP</i>	42
3.2.2 Contraintes et Ontologies	44
3.2.3 Contraintes et Connaissances empiriques	45
3.2.4 Contraintes et Connaissances contextuelles	46
3.3 Synthèse du chapitre	48
4 Exploitation des connaissances et Filtrage	51
4.1 Méthodes de traitement des <i>CSP</i>	52
4.1.1 Méthodes de filtrage des <i>CSP</i>	52
4.1.2 Méthodes de résolution et <i>CSP</i>	52
4.1.3 Diversité compilée et <i>CSP</i>	53
4.2 Apports et Contributions Scientifiques	53

4.2.1	CoFiADe : <i>Constraint Filtering for Aiding Design</i>	54
4.2.2	Méthodes de filtrage et contraintes par morceaux	54
4.2.3	Méthodes de filtrage et contraintes contextuelles	56
4.2.4	Méthodes de filtrage et algorithmes évolutionnaires	58
4.3	Synthèse du chapitre	61
5	Configuration interactive et Extensions	63
5.1	Configuration étendue	64
5.1.1	Du Prix à la Performance	64
5.1.2	Du produit au Modèle Générique	64
5.1.3	Du Produit à la Production et Documentation	65
5.2	Apports et Contributions Scientifiques	66
5.2.1	Du Prix à l'Évaluation Multi-Critère	66
5.2.2	Du produit aux Modèles Génériques	69
5.2.3	Du Produit aux Processus	71
5.2.4	À la Synchronisation des Processus	75
5.3	Synthèse du chapitre	77
6	Conclusions et Projets de Recherche	79
6.1	Synthèse des activités de recherche et Contributions	79
6.2	Projet de recherche	81
6.2.1	Configuration, PRAO et Risques	82
6.2.2	Filtrage et Algorithmes Évolutionnaires	83
6.2.3	Dynamique des Modèles de Connaissances	84
6.2.4	Configuration interactive et Utilisateur	85
IV	Bibliographie générale	87

PARTIE I

Curriculum Vitae et Synthèses des activités scientifiques et pédagogiques

Dr. Élise Vareilles

Maître-Assistant, 4^e échelon
École des Mines d'Albi-Carmaux

École des mines d'Albi-Carmaux
Centre Génie Industriel
Route de Teillet 8100 Albi

☎ +33 5 63 49 30 92

☎ +33 6 63 49 30 92

FAX +33 5 63 49 31 38

✉ elise.vareilles@mines-albi.fr

🌐 <http://perso.mines-albi.fr/~vareille>

Née le 20 novembre 1978

Pacsée, 2 enfants (5 et 3 ans)

Diplômes et Études

- 2005 **Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Toulouse (INPT)**, Soutenu le 24 juin 2005, Intitulé : *Conception et approches par contraintes : contribution à la mise en oeuvre d'un outil d'aide interactif*, Spécialité : Systèmes Industriels, Mention très Honorable, travaux distingués par le prix Léopold Escande 2005.
Jury composé de :
— Rapporteurs : Prof. F. BENHAMOU et Prof. A. BERNARD
— Examinateurs : Prof. L. GENESTE, Prof. J-P NADEAU, Dr. P. LAMESLE, Ing. Ph. DAVID
— Équipe d'encadrement : Prof. M. ALDANONDO, Dr. K. HADJ HAMOU et Dr. P. GABORIT
- 2002 **Diplôme d'Études Approfondies de l'Université Paul Sabatier de Toulouse**, Spécialité : *Programmation et systèmes*.
- 2001 **Titre d'Ingénieur Maître de l'Université Paul Sabatier de Toulouse**, Spécialité : *Génie Mathématique et Informatique*.
- 2001 **Maîtrise de l'Université Paul Sabatier de Toulouse**, IUP Systèmes Intelligents, Spécialité : *Génie Mathématique et Informatique*.

Parcours Professionnel

- Sept. 2005 **Enseignant-Chercheur**, Maître-assistant, au centre Génie Industriel, de l'école des mines d'Albi-Carmaux .
- 2002-2005 **Ingénieur de recherche-Doctorante**, CDD/CFR de 3 ans, ARMINES, Association de recherche contractuelle, partenaire des grandes écoles d'ingénieurs, Albi.
- 2001 **Stage d'ingénieur maître**, 6 mois, Renault Automation Comau, Castres.

Synthèse des Publications

10 Revues internationales référencées Web of Science.

ICAE(1), AIEDAM(1), CII(1) IJPR (2), EAAI (2), JIM(1), IJCIM(2)

25 Conférences internationales Web of Science ou LNCS.

IEEM(6), CP(1), AIAI(3), PLM(3), INCOM(3), CSDM(2), SKIMA(3) ...

11 Conférences internationales avec actes édités.

MOSIM (6), IESM (2) ...

16 Configuration Workshop ou JFPC.

Workshop Configuration(8), JFPC (8)

Synthèse des Activités d'Encadrement Scientifique

3 Thèses en cours, *Taux encadrement : 120%*.

A.-F. Barco Santa (2016), L. I. Garcés Monge (2018), A. Sylla (2018).

3 Thèses soutenues, *Taux encadrement cumulé : 110%*.

A. Codet de Boisse (2013), J. Abeille (2011), M. Djefel (2010).

2 Post-doctorats, *Taux encadrement cumulé : 60%*.

P. Pitiot (2010), C. Béler (2009).

3 Masters, *Taux encadrement cumulé : 200%*.

É. Villeneuve (2009), G. Goris (2008), D. Ghilés (2007).

Synthèse du Rayonnement Scientifique

Comité de pilotage, *3 Sessions spéciales*.

APMS(2014), INCOM(2012), MOSIM(2010).

Comité scientifique, *12 Conférences*.

PLM(2015), Pro-Ve(2015), Configuration Workshop(2010, 2012, 2014, 2015), JFPC([2009, 2013])

Comité d'organisation, *5 Événements*.

CP(2016), Pro-Ve(2015), I-ESA(2014), JFPC(2012), GDR MACS(2012).

Collaboration internationale, *5 Universités*.

Danemark(2015, 2013), Vietnam(2014), Colombie(2013), Pays-Bas(2011), Québec(2010).

Séjours invités : 2 mois Danemark (2015), 2 semaines Québec (2010).

Participation à des jurys extérieurs, *3 Thèses*.

Nicolas Schmidt (2015), Aurélien Reyssset (2015), Juan Camilo Romero Bejarano (2013).

Relecture d'articles de journaux WoS, *5 articles / an*.

JIM, AIEDAM, DSS, KNO-SYS, EAAI

Synthèse des Projets de Recherche

2013-2016 **Projet CRIBA**, *Construction et Rénovation Industrialisées Bois Acier*.

2013-2015 **Projet 2Π-MCO**, *Amélioration de la Productivité des PME en Ingénierie Électrique dans le domaine du Maintien en Condition Opérationnelle*.

2008-2011 **Projet Hélimaintenance**, *Plate-forme intégrée de maintenance Hélicoptère*.

2007-2011 **Projet ATLAS**, *Aides et assisTances pour la conception, la conduite et leur coupLage par les connAissanceS*.

2002-2005 **Projet VHT**, *Virtual Heat Treatment*.

Synthèse des Valorisations Logicielles

CoFiADe, *Constraint Filtering for Aiding Design*.

Plateforme CRIBA, *Configuration de calepinage de façades*.

Plateforme ATLAS, *Conception simultanée produit - projet*.

Synthèse des Activités Pédagogiques

Activités d'enseignement, *École des mines d'Albi-Carmaux*.

environ 250 heures « équivalent TD »

Activités d'encadrement pédagogiques, École des mines d'Albi-Carmaux.

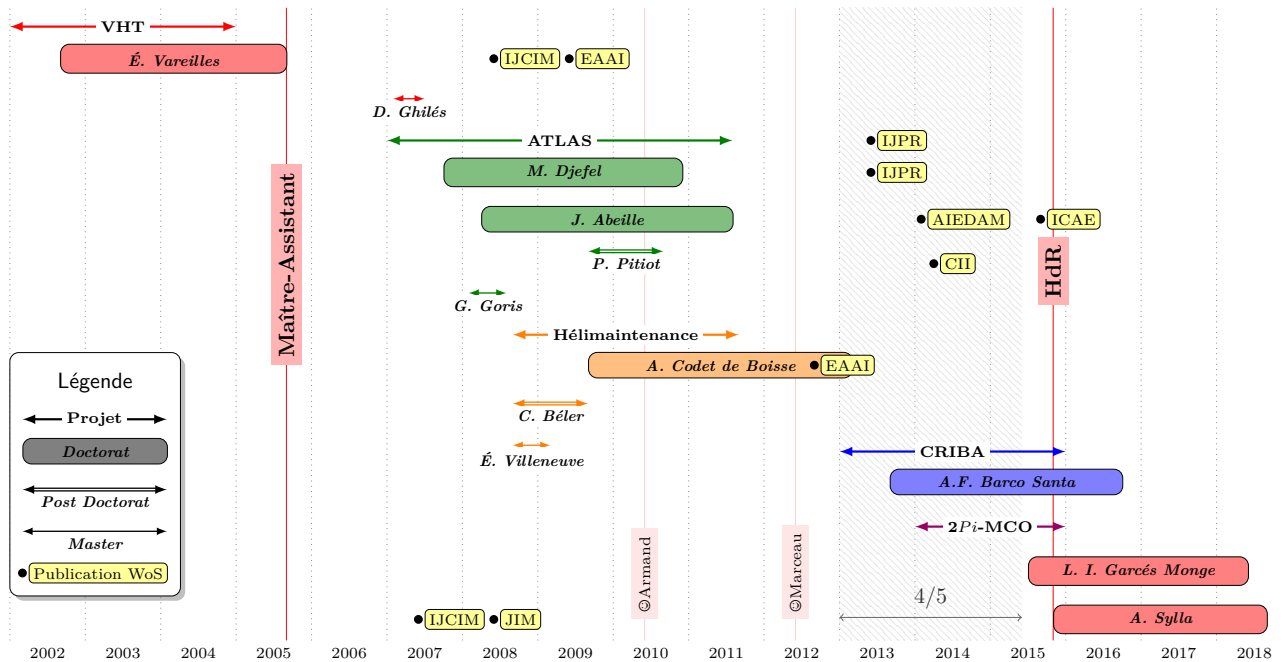
- Stage de M2 et M1 : 6 à 8 étudiants/ an,
- Suivi individualisé : 10 étudiants ou apprentis / an,

Activités d'enseignement doctorales, GDR MACS, EdSys.

Conception et Intelligence Artificielle, module Conception et Contraintes

- GDR MACS, 2013 (4h30),
- EdSys, 2014 (7 heures).

Synthèse des Activités de Recherche



Jury d'Habilitation à Diriger des Recherches

Jury envisagé pour l'Hdr d'Élise Vareilles, ordre alphabétique.

- Pr. Michel ALDANONDO (CNU 61) - examinateur
- Ing. Jean-Marc ASTESANA (Renault) - invité
- Pr. Emmanuel CAILLAUD (CNU 60) - rapporteur
- Pr. Hélène FARGIER (CNU 27) - examinatrice
- Pr. Laurent GENESTE (CNU 61) - correspondant INPT
- Pr. Narendra JUSSIEN (CNU 27) - examinateur
- Pr. Bernard PENZ (CNU 61) - rapporteur
- Pr. Gilles TROMBETTONI (CNU 27) - rapporteur

Liste des publications WoS

10 Revues internationales référencées *Web of Science*.

- 2015 [Vareilles+2015], E. Vareilles, T. Coudert, M. Aldanondo, L. Geneste, J. Abeille, System Design and Project Planning : model and rules to manage their interactions, Integrated Computer-aided Engineering, ICAE, in press, 2015, DOI : 10.3233/ICA-150494.
Impact Factor : 4.667 (2013)
- 2014 [Romero Bejarano+2014], J-C. Romero Bejarano, T. Coudert, É. Vareilles, L. Geneste, M. Aldanondo and J. Abeille, Case-based reasoning and system design : An integrated approach based on ontology and preference modeling, Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing, AIEDAM, vol. 28(1), pp. 49-69, 2014.
Impact Factor : 0.407 (2012)
- 2014 [Pitiot+2014], P. Pitiot, M. Aldanondo and É. Vareilles, Concurrent product configuration and process planning : Some optimization experimental results, Computers in Industry, CII, vol. 65(4), pp. 610-621, 2014.
Impact Factor : 1.709 (2012)
- 2013 [Pitiot+2013], P. Pitiot, M. Aldanondo, É. Vareilles, P. Gaborit, M. Djefel and S. Carbonnel, Concurrent product configuration and process planning, towards an approach combining interactivity and optimality, International Journal of Production Research, IJPR, vol. 51(2), pp. 524-541, 2013.
Impact Factor : 1.460 (2012)
- 2013 [Zhang+2013], L. Zhang, É. Vareilles and M. Aldanondo, Generic bill of functions, materials, and operations for SAP(2) configuration, International Journal of Production Research, IJPR, vol. 51(2), pp. 465-478, 2013.
Impact Factor : 1.460 (2012)
- 2012 [Vareilles+2012], É. Vareilles, M. Aldanondo, A. Codet de Boisse, T. Coudert, P. Gaborit and L. Geneste, How to take into account general and contextual knowledge for interactive aiding design : Towards the coupling of CSP and CBR approaches, Engineering Applications of Artificial Intelligence, EAAI, vol. 25(1), pp. 31-47, 2012.
Impact Factor : 1.625 (2012)
- 2009 [Vareilles+2009], É. Vareilles, M. Aldanondo, and P. Gaborit, How to take into account piecewise constraints in constraint satisfaction problems, Engineering Applications of Artificial Intelligence, EAAI, vol. 22(4-5), pp. 778-785, 2009.
Impact Factor : 1.444 (2009)
- 2008 [Aldanondo+2008a], M. Aldanondo and É. Vareilles, Configuration for mass customization : how to extend product configuration towards requirements and process configuration, Journal of Intelligent Manufacturing, JIM, vol. 19(5), pp. 521-535, 2008.
Impact Factor : 1.018 (2008)
- 2008 [Aldanondo+2008b], M. Aldanondo, É. Vareilles, K. Hadj-Hamou and P. Gaborit, Aiding design with constraints : an extension of quad trees in order to deal with piecewise functions, International Journal of Computer Integrated Manufacturing, IJCIM, vol. 21(4), pp. 353-365, 2008.
Impact Factor : 0.722 (2008)

- 2007 [Vareilles+2007], *É. Vareilles, M. Aldanondo and P. Gaborit*, Evaluation and design : a knowledge-based approach, International Journal of Computer Integrated Manufacturing, IJCIM, vol. 20(7), pp. 639-653, 2007.
Impact Factor : 0.722 (2008)

Activités d'Encadrement Scientifique

- 2015-2018 **Doctorat Abdourahim Sylla**, *Aide à la décision en appel d'offre : une approche intégrée de conception conjointe produit-processus, de gestion des risques et de retour d'expérience.*
- Projet : \emptyset
 - En cours
 - *Web of Science* : \emptyset
 - \neg *Web of Science* : \emptyset
 - Taux encadrement : 30%
- 2015-2018 **Doctorat Luis Ignacio Garcés Monge**, *Générateur de cas de tests à base de contraintes et algorithmes évolutionnaires.*
- Projet : \emptyset
 - En cours
 - *Web of Science* : \emptyset
 - \neg *Web of Science* : Workshop Configuration(1)
 - Taux encadrement : 30%
- 2013-2016 **Doctorat Andrés Felipe Barco Santa**, *Configuration interactive du processus de rénovation de bâtiments d'habitation à haute performance énergétique.*
- Projet : CRIBA
 - En cours
 - *Web of Science* : \emptyset
 - \neg *Web of Science* : Workshop Configuration(2), ISMIS(2), PLM(1), CP(1), AIAI (2)
 - Taux encadrement : 60%
- 2009-2013 **Doctorat Aurélien Codet de Boisse**, *Aide à la décision en maintenance d'hélicoptères civils par l'exploitation de connaissances capitalisées : couplage des approches CSP et CBR.*
- Projet : Hélimaintenance
 - Soutenue : le 05 février 2013 devant le jury composé de :
 - Rapporteurs : Prof. J.-Y. DANTAN et Prof. E. CAILLAUD,
 - Examineurs : Prof. L. ROUCOULES, Dr. R. CHENOUD, Dr. R. CHENOUD,
 - Équipe d'encadrement : Prof. M. ALDANONDO, Dr. T. COUDERT, Pr. L. GENESTE et Dr. É. VAREILLES
 - *Web of Science* : EAAI(1)
 - \neg *Web of Science* : MOSIM(1)
 - Taux encadrement : 30%
 - Devenir : Président InteropSys

- 2009-2011 **Doctorat Joël Abeille**, *Vers un couplage des processus de conception systèmes et de planification de projets : formalisation de connaissances méthodologiques et de connaissances métier.*
- Projet : ATLAS en convention C.I.F.R.E. avec *Pulsar Innovation* à Toulouse,
 - Soutenue : le 06 juillet 2011 devant le jury composé de :
 - Rapporteurs : Pr. J. RENAUD et Pr. A. THOMAS,
 - Examineurs : Pr. S. LAMOURI, Dr. N. TROUSSIER (HdR), T. ROUX,
 - Équipe d'encadrement : Pr. M. ALDANONDO, Dr. T. COUDERT, Pr. L. GENESTE et Dr. É. VAREILLES
 - *Web of Science* : ICAE (1), AIEDAM (1)
 - \neg *Web of Science* : INCOM(2), CSDM(2), SKIMA(1)
 - Taux d'encadrement : 30%
 - Devenir : Ingénieur de calcul chez Sud Ingénierie
- 2007-2010 **Doctorat Mériem Djefel**, *Couplage de la configuration de produit et de projet de réalisation : exploitation des approches par contraintes et des algorithmes évolutionnaires.*
- Projet : ATLAS
 - Soutenue : le 17 novembre 2010 devant le jury composé de :
 - Rapporteurs : Pr. É. BONJOUR et Pr. P.-A. YVARS,
 - Examineurs : Pr. A. BOURAS, Pr. S. GOMES, Dr. T. COUDERT,
 - Équipe d'encadrement : Pr. M. ALDANONDO, Pr. C. BARON et Dr. É. VAREILLES
 - *Web of Science* : IJPR(1)
 - \neg *Web of Science* : AIAI(1), IEEM(2), INCOM(1)
 - Taux encadrement : 50%
 - Devenir : Consultant BI TALEND chez Adservio IT
- 2009-2010 **Post-Doctorat Paul Pitiot.**
- Projet : ATLAS
 - *Web of Science* : IJPR(1), CII (1), EAAI (1)
 - \neg *Web of Science* : AIAI(1), IEEM(2), INCOM(1)
 - Taux encadrement : 30%
 - Devenir : Maître de conférences à 3IL Rodez
- 2008-2009 **Post-Doctorat Cédric Béler.**
- Projet : Hélimaintenance
 - *Web of Science* : \emptyset
 - \neg *Web of Science* : Workshop Configuration(1)
 - Taux encadrement : 30%
 - Devenir : Maître de conférences à l'ENI de Tarbes
- 2008-2009 **Master M2 Éric Villeneuve.**
- Projet : Hélimaintenance
 - *Web of Science* : \emptyset
 - \neg *Web of Science* : Workshop Configuration(1)
 - Taux encadrement : 60%
 - Devenir : Post-Doctorant à l'ENI de Tarbes
- 2008 **Master M1 Guillaume Goris.**
- Projet : ATLAS
 - *Web of Science* : \emptyset
 - \neg *Web of Science* : CGI(1)
 - Taux encadrement : 70%
 - Devenir : Consultant en ergonomie et expérience utilisateur chez Wax Interactive
- 2007 **Master M1 Damien Ghilés.**
- Projet : \emptyset
 - *Web of Science* : \emptyset
 - \neg *Web of Science* : \emptyset
 - Taux encadrement : 70%
 - Devenir : Analyste programmeur chez Percall

Rayonnements Scientifiques

Comité de pilotage, 3 Session spéciales.

- 5th IFIP Advances in Production Management Systems, APMS 2014, intitulée « Design for Lean Manufacturing »
- 14th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing, INCOM 2012, intitulée « Extended Product Design and Product Lifecycle Management »
- 8^e ENIM IFAC Conférence Internationale de Modélisation et Simulation, MOSIM 2010, intitulée « conception étendue »

Comité scientifique, 12 Conférences.

- Product Lifecycle Management, PLM, 2015
- Working Conference on Virtual Enterprises, Pro-Ve, 2015
- Configuration Workshop, 2010, 2012, 2014, 2015
- Journées Française de Programmation par Contraintes, JFPC, de 2009 à 2013

Comité d'organisation, 5 Événements.

- 22th International Conference on Principles and Practice of Constraint Programming, CP, Toulouse, 2016
- Working Conference on Virtual Enterprises, Pro-Ve, Albi, 2015
- 17th International Conference Interoperability for enterprises Systems and Applications, I-Esa, Albi, 2014
- Journées Française de Programmation par Contraintes, JFPC, Toulouse, 2012
- 16^e journées STP du GdR MACS, Albi, 2012

Collaboration internationale, 5 Universités.

- Danmarks Tekniske Universitet, Danemark, Dr. C. Thuesen, 2013 et 2015
 - Échange académique de 2 mois en 2013 (accueil Dr. C. Thuesen à Mines Albi-Carmaux), projet CRIBA, Publication : Workshop Configuration(1),
 - Échange académique de 2 mois en 2015 (accueil Dr. É. Vareilles à DTU).
- University of Economics and Business, Vietnam, Dr. M. Nguyen Dang, 2014, organisation session spéciale APMS 2014,
- Pontificia Universidad Javeriana, Colombie, Ing. A-F. Barco Santa, 2013, projet CRIBA, Publication : IEEM(1),
- Rijksuniversiteit Groningen, Pays Bas, Dr. L. Zhang, 2011, projet ATLAS, organisation session spéciale INCOM 2012,
- École Polytechnique de Montréal, Canada, Pr. B. Agard, 2010
 - Échange académique de 2 semaines en 2010,
 - Expertise *Data Mining* de la thèse A. Codet de Boisse, projet Hélimaintenance.

Participation à des jurys extérieurs, 3 Thèses.

- Doctorat Nicolas Schmidt, *Compilation de connaissances - application à la configuration de produits*, soutenance prévue le 17 septembre 2015, Université d'Artois, examinatrice.
- Doctorat Aurélien Reysset, *Conception préliminaire d'actionneurs électromécaniques - outils d'aide à la spécification et à la génération de procédures de dimensionnement pour l'optimisation*, soutenue le 23 janvier 2015, INSA Toulouse, examinatrice.
- Doctorat Juan Camilo Romero Bejarano, *Collaborative Problem Solving Within Supply Chains : General Framework, Process and Methodology*, soutenue le 03 décembre 2013, ENI Tarbes, examinatrice.

Relecture d'articles de journaux WoS, 5 articles / an.

JIM, AIEDAM, DSS, KNO-SYS, EAAI

Projets de Recherche

- 2013-2016 **Projet CRIBA**, *Construction et Rénovation Industrialisées Bois Acier*.
— Financement : ADEME
— Budget : 8.7 M€, subvention Mines-Albi-CGI : 340 K€
— Role : Aide au montage, Responsable Scientifique Centre Génie Industriel, Pilotage d'un lot de travail
— Doctorant : Andrés Felipe Barco Santa (en cours)
- 2014-2015 **Projet 2II-MCO**, *amélioration de la Productivité des PME en Ingénierie électrique dans le domaine du MCO*.
— Financement : sous-traitance École Nationale d'Ingénieur de Tarbes
— Budget : 2.9 M€, subvention Mines-Albi-CGI : 20 K€
— Rôle : Expertise en configuration de produits et contraintes
— Doctorant : ∅
- 2008-2011 **Projet Hélimaintenance**, *Plate-forme intégrée de maintenance Hélicoptère*.
— Financement : FUI
— Budget : 10.5 M€, subvention Mines-Albi-CGI : 170 K€
— Rôle : Aide au montage
— Doctorant : Aurélien Codet de Boisse (2013)
- 2007-2011 **Projet ATLAS**, *Aides et assisTances pour la conception, la conduite et leur coupLage par les connAissanceS*.
— Financement : ANR RNTL
— Budget : 1.7 M€, subvention Mines-Albi-CGI : 130 K€
— Rôle : Aide au montage, Pilotage d'un lot de travail
— Doctorants : Mériem Djefel (2010) et Joël Abeille (2011)
- 2002-2005 **Projet VHT**, *Virtual Heat Treatment*.
— Financement : IMS
— Budget : 1.7 M€, subvention Mines-Albi-CGI : 140 K€
— Rôle : Doctorat
— Doctorant : Élise Vareilles (2005)

Valorisations Logicielles

CoFiADe, *Constraint Filtering for Aiding Design*.

<http://cofiade.mines-albi.fr/newcofiade/>

- Langage : Perl
- Projets de recherche : CRIBA, 2II-MCO, Hélimaintenance, ATLAS, VHT

Plateforme CRIBA, *Configuration de calepinage de façades*.

<http://gind.mines-albi.fr/fr/projet/criba>

- Langage : Java, Perl
- Projets de recherche : CRIBA

Plateforme ATLAS, *Conception simultanée produit - projet*.

<http://193.51.2.246/atlas>

- Langage : Ruby, Perl
- Projets de recherche : ATLAS

Activités Pédagogiques

Activités d'enseignement, École des mines d'Albi-Carmaux.

- Public : étudiants en formation initiale et formation par apprentissage de niveau Bac +2 à Bac +5,
- Volume : Montage et réalisation d'enseignements pour un volume annuel moyen de 140 heures face étudiants par an ou 950 Heures Allouées par an (moyenne des enseignants-chercheurs à l'école des mines d'Albi-Carmaux à 710 Heures Allouées)
NB : Selon les standards de l'Enseignement Supérieur, cette charge correspond à environ 250 heures « équivalent TD »
- Principales disciplines enseignées : cahier des charges fonctionnels, analyse des systèmes, algorithmique et programmation, Perl, gestion de projet, qualité, conception de systèmes, suivi de projets d'étudiants ...
- Responsabilités : UE Maîtrise d'oeuvre en M2, option Génie des Systèmes d'Information (8 crédits ECTS), cours de Perl (7h30), algorithmique et programmation (avec Paul Gaborit, 15 h)

Activités d'encadrement pédagogiques, École des mines d'Albi-Carmaux.

- Travaux de fin d'études : 4 étudiants de M2 / an,
- Stage de M1 : 4 étudiants M1 / an,
- Suivi individualisé d'étudiants : 8 étudiants / an,
- Suivi individualisé d'apprentis : 3 apprentis / an.

Activités d'enseignement doctorales, GDR MACS, EdSys.

Conception et Intelligence Artificielle, module Conception et Contraintes

- École GDR MACS, 2013 (4h30) : doctorants GDR MACS,
- EdSys, 2014 (7h) : doctorants d'École doctorale Système, INP Toulouse.

Innovations pédagogiques, École des mines d'Albi-Carmaux.

- Conception de systèmes, M2 option Génie Industriel : utilisation de Lego®Mindstorms et de PTC Windchill
- Introduction à la configuration, nuit des chercheurs 2015, grand public : utilisation de Lego Duplo

PARTIE

Bibliographie personnelle

Bibliographie personnelle

Revues Internationales référencées Web of Science

- [Vareilles+2015] E. VAREILLES, T. COUDERT, M. ALDANONDO, L. GENESTE et J. ABEILLE. « System Design and Project Planning : model and rules to manage their interactions ». In : *Integrated Computer-Aided Engineering* (2015).
- [Romero Bejarano+2014] J. C. ROMERO BEJARANO, T. COUDERT, E. VAREILLES, L. GENESTE, M. ALDANONDO et J. ABEILLE. « Case-based reasoning and system design: An integrated approach based on ontology and preference modeling ». In : *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing* 28 (01 fév. 2014), p. 49–69.
- [Pitiot+2014] P. PITIOT, M. ALDANONDO et E. VAREILLES. « Concurrent product configuration and process planning: Some optimization experimental results ». In : *Computers in Industry* 65.4 (2014), p. 610–621.
- [Pitiot+2013] P. PITIOT, M. ALDANONDO, E. VAREILLES, P. GABORIT, M. DJEFEL et S. CARBONEEL. « Concurrent product configuration and process planning, towards an approach combining interactivity and optimality ». In : *International Journal of Production Research* 51.2 (2013), p. 524–541.
- [Zhang+2013] L. ZHANG, E. VAREILLES et M. ALDANONDO. « Generic bill of functions, materials and operations for SAP2 configuration ». In : *International Journal of Production Research* 51.2 (2013), p. 465–478.
- [Vareilles+2012] E. VAREILLES, M. ALDANONDO, A. CODET DE BOISSE, T. COUDERT, P. GABORIT et L. GENESTE. « How to take into account general and contextual knowledge for interactive aiding design : Towards the coupling of CSP and CBR approaches. » In : *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 25.1 (2012), p. 31–47.
- [Vareilles+2009] E. VAREILLES, M. ALDANONDO et P. GABORIT. « How to take into account piecewise constraints in constraint satisfaction problems. » In : *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 22.4-5 (mai 2009), p. 778–785.
- [Aldanondo+2008a] M. ALDANONDO et E. VAREILLES. « Configuration for mass customization: how to extend product configuration towards requirements and process configuration ». English. In : *Journal of Intelligent Manufacturing* 19.5 (2008), p. 521–535.
- [Aldanondo+2008b] M. ALDANONDO, E. VAREILLES, K. HADJ-HAMOU et P. GABORIT. « Aiding design with constraints: an extension of quad trees in order to deal with piecewise functions ». In : *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* 21.4 (2008), p. 353–365.

- [Vareilles+2007] E. VAREILLES, M. ALDANONDO et P. GABORIT. « **Evaluation and design: a knowledge-based approach** ». In : *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* 20.7 (2007), p. 639–653.

Revue Internationale non indexée Web of Science

- [Aldanondo+2010] M. ALDANONDO, E. VAREILLES et M. DJEFEL. « **Towards an association of product configuration with production planning** ». In : *International Journal of Mass Customisation* 3.4 (2010), p. 316–332.
- [Aldanondo+2007] M. ALDANONDO, E. VAREILLES, Y. LAHMAR, C. BARON et G. MOYNARD. « Une approche pour la configuration cohérente de produit et de gamme de production ». In : *Journal Européen des Systèmes Automatisés* 51.5 (2007), p. 567–584.

Conférence internationale avec actes indexés Web of Science ou Lecture Notes in Computer Science (LNCS)

- [Barco+2015a] A.F. BARCO, E. VAREILLES, M. ALDANONDO et P. GABORIT. « Building Thermal Renovation Overview Combinatorics + Constraints + Support System ». In : *Foundations of Intelligent Systems - 22nd International Symposium, ISMIS*. Oct. 2015.
- [Barco+2015b] A.F. BARCO, E. VAREILLES, M. ALDANONDO et P. GABORIT. « Layout Synthesis for Symmetrical Facades : Constraint-Based Support for Architects Decision-Making ». In : *Artificial Intelligence Applications and Innovations*. Sept. 2015.
- [Barco Santa+2015] A.F. BARCO SANTA, J.G. FAGES, E. VAREILLES, M. ALDANONDO et P. GABORIT. « Open Packing for Facade-Layout Synthesis Under a General Purpose Solver ». In : *21st International Conference on Principles and Practice of Constraint Programming (CP 2015)*. Sous la dir. de Springer International Publishing Switzerland 2015. 2015.
- [Aldanondo+2014] M. ALDANONDO, A.F. BARCO-SANTA, E. VAREILLES, M. FALCON, P. GABORIT et L. ZHANG. « **Towards a BIM Approach for a High Performance Renovation of Apartment Buildings** ». English. In : *Product Lifecycle Management for a Global Market*. Sous la dir. de Shuichi FUKUDA, Alain BERNARD, Balan GURUMOORTHY et Abdelaziz BOURAS. T. 442. IFIP Advances in Information and Communication Technology. Springer Berlin Heidelberg, 2014, p. 21–30.
- [Barco Santa+2014] A. F. BARCO SANTA, E. VAREILLES, M. ALDANONDO et P. GABORIT. « **A Recursive Algorithm for Building Renovation in Smart Cities** ». English. In : *Foundations of Intelligent Systems*. Sous la dir. de Troels ANDREASEN, Henning CHRISTIANSEN, Juan-Carlos CUBERO et Zbigniew W. RA. T. 8502. Lecture Notes in Computer Science. Springer International Publishing, 2014, p. 144–153.
- [Pitiot+2013] P. PITIOT, M. ALDANONDO, E. VAREILLES, T. COUDERT et L. ZHANG. « Optimizing concurrent configuration and planning : A proposition to reduce computation time ». In : *Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM), 2013 IEEE International Conference on*. Outstanding Paper Award. Déc. 2013, p. 1367–1371.
- [Vareilles+2013] E. VAREILLES, A.F. BARCO SANTA, M. FALCON, M. ALDANONDO et P. GABORIT. « Configuration of high performance apartment buildings renovation : A constraint based approach ». In : *Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM), 2013 IEEE International Conference on*. Déc. 2013, p. 684–688.

-
- [Coudert+2012] T. COUDERT, E. VAREILLES, L. GENESTE et M. ALDANONDO. « Improvement of retrieval in case-based reasoning for system design ». In : *Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM), 2012 IEEE International Conference on*. Déc. 2012, p. 1538–1542.
- [Zhang+2012] L. ZHANG, E. VAREILLES, M. ALDANONDO et P. HELO. « Generic modeling propositions for configuring, sale, product and production ». In : *Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM), 2012 IEEE International Conference on*. Déc. 2012, p. 1959–1963.
- [Pitiot+2012] P. PITIOT, M. ALDANONDO, É. VAREILLES, L. ZHANG et L. COUDERT. « **Some Experimental Results Relevant to the Optimization of Configuration and Planning Problems** ». English. In : *Foundations of Intelligent Systems*. Sous la dir. de Li CHEN, Alexander FELFERNIG, Jiming LIU et Zbigniew W RAŚ. T. 7661. Lecture Notes in Computer Science. Springer Berlin Heidelberg, 2012, p. 301–310.
- [Vareilles+2012] E. VAREILLES, T. COUDERT, M. ALDANONDO, L. GENESTE et J. ABEILLE. « Coupling system design and project planning : discussion on a bijective link between system and project structures ». In : *14th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing, INCOM'2012*. Bucharest, Romania, 2012, pp. 1089–1094.
- [Coudert+2011a] T. COUDERT, E. VAREILLES, M. ALDANONDO, L. GENESTE et J. ABEILLE. « Synchronization of system design and project planning : Integrated model and rules ». In : *Software, Knowledge Information, Industrial Management and Applications (SKIMA), 2011 5th International Conference on*. Sept. 2011, p. 1–6.
- [Coudert+2011b] T. COUDERT, E. VAREILLES, L. GENESTE, M. ALDANONDO et J. ABEILLE. « **Proposal for an Integrated Case Based Project Planning** ». English. In : *Complex Systems Design & Management*. Sous la dir. d'Omar HAMMAMI, Daniel KROB et Jean-Luc VOIRIN. Springer Berlin Heidelberg, 2011, p. 133–144.
- [Pitiot+2010a] P. PITIOT, M. ALDANONDO, M. DJEFEL, E. VAREILLES, P. GABORIT et T. COUDERT. « Using constraints filtering and evolutionary algorithms for interactive configuration and planning ». In : *Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM), 2010 IEEE International Conference on*. Best Paper Award. Déc. 2010, p. 1921–1925.
- [Abeille+2010] J. ABEILLE, T. COUDERT, E. VAREILLES, L. GENESTE, M. ALDANONDO et T. ROUX. « **Formalization of an Integrated System/Project Design Framework: First Models and Processes** ». English. In : *Complex Systems Design & Management*. Sous la dir. de Marc AIGUIER, Francis BRETAEU et Daniel KROB. Springer Berlin Heidelberg, 2010, p. 207–217.
- [Pitiot+2010b] P. PITIOT, M. ALDANONDO, E. VAREILLES, P. GABORIT, M. DJEFEL et C. BARON. « **Aiding Interactive Configuration and Planning: A Constraint and Evolutionary Approach** ». In : *Artificial Intelligence Applications and Innovations (AIAI2010)*. Sous la dir. d'Harris Papadopoulos ; Andreas S. Andreou ; Max BRAMER. T. 339. IFIP Advances in Information and Communication Technology. Springer, 2010, p. 238–245.
- [Vareilles+2009] E. VAREILLES, S. CARBONNEL, M. DJEFEL et M. ALDANONDO. « Coupling Product and Project Configuration with Constraints : a CSP Software Comparison ». In : *3th Int. conf. on Software, Knowledge Information, SKIMA 2009*. Fes, Maroc, oct. 2009.
- [Aldanondo+2009] M. ALDANONDO, E. VAREILLES, M. DJEFEL, P. GABORIT et J. ABEILLE. « Coupling product configuration and process planning with constraints ». In : *INCOM 2009 & IFAC 2009 - 13th IFAC Symposium on information control problems in manufacturing*. Moscow, RUSSIA, juin 2009, p. 63–68.

- [Aldanondo+2008] M. ALDANONDO, E. VAREILLES, M. DJEFEL et C. BARON. « Product and process configuration : A constraint based approach ». In : *Industrial Engineering and Engineering Management, 2008. IEEM 2008. IEEE International Conference on*. Déc. 2008, p. 2010–2014.
- [Vareilles+2008] E. VAREILLES, M. ALDANONDO, P. GABORIT, G. AURIOL, S. ROCHER et C. BARON. « A prospective proposal for coupling product and project configuration with constraints ». In : *2nd Int. conf. on Software, Knowledge Information, SKIMA 2008*. Kathmandu, NEPAL, mar. 2008, p. 148–153.
- [Vareilles+2007] E. VAREILLES, M. ALDANONDO, Y. LAHMAR, C. BARON, L. GENESTE et M. ZOLGHADRI. « Coupling Product Development and Project Management with Constraint : a Prospective Work ». In : *5th International Conference on Product Lifecycle Management*. Italy, juil. 2007, p. 137–146.
- [Zolghadri+2007] M. ZOLGHADRI, C. BARON, P. GIRARD, M. ALDANONDO et E. VAREILLES. « Linking product architecture and network of partners ». In : *5th International Conference on Product Lifecycle Management*. Italy, juil. 2007, p. 353–362.
- [Baron+2006] C. BARON, M. ZOLGHADRI, D. ESTÈVE, L. GENESTE, M. ALDANONDO et E. VAREILLES. « Product and Project Co-design : what do system engineering standards recommend ? » In : *Virtual Concept*. Sous la dir. de SPRINGER. T. 2. 2-287-48663-2. 9. Playa Del Carmen, Mexico : Xavier Fischer and Daniel Coutellier, nov. 2006, p. 36.
- [Aldanondo+2006] M. ALDANONDO, E. VAREILLES, K. HADJ-HAMOU et P. GABORIT. « A constraint based approach for aiding heat treatment operation design and distortion evaluation ». In : *Artificial Intelligence, Applications and Innovations (AIAI 2006)*. T. 204. Athens, Greece, juin 2006, p. 254–261.
- [Vareilles+2006] E. VAREILLES, M. ALDANONDO, P. GABORIT et K. HADJ-HAMOU. « Evaluation of a solution in interactive aiding design process ». In : *IFAC International Symposium on Information Control Problems in Manufacturing INCOM*. Sous la dir. d'A. Dolgui et AL. T. 2. Saint Etienne, France : Elsevier Science, mai 2006, p. 757–762.

Conférences internationales avec actes édités

- [Pitiot+2012] P. PITIOT, M. ALDANONDO, E. VAREILLES et P. GABORIT. « Configuration / Planification : Expérimentations en Optimisation évolutionnaire sous contraintes ». In : *9th International Conference of Modeling and Simulation, MOSIM 2010*. Bordeaux, France, juin 2012, p. 740–747.
- [Codet de Boisse+2010] A. CODET DE BOISSE, E. VAREILLES et M. GABORIT P. andAldanondo. « Couplage CSP et CBR : premières identifications des modes de couplage ». In : *8th International Conference of Modeling and Simulation, MOSIM 2010*. isbn : 978-2-7430-1330-1. Hammamet Tunisia, mai 2010, p. 740–747.
- [Aldanondo+2010] M. ALDANONDO, É. VAREILLES, J. ABEILLE, T. COUDERT et L. GENESTE. « System Design and Design Planning : an Interaction Identification ». In : *8th International Conference of Modeling and Simulation, MOSIM 2010*. isbn : 978-2-7430-1330-1. 2010.
- [Vareilles+2008] E. VAREILLES, M. ALDANONDO, M. DJEFEL et GABORIT. « Coupling interactively product and project configuration : a proposal using constraints programming ». In : *International Mass Customization Meeting & International conference on Economic, Technical and Organizational aspects of Product configuration systems, IMCM & PETO 2008*. isbn : 978-87-90855-12-3. Copenhagen, Denmark, juin 2008.

-
- [Aldanondo+2008] M. ALDANONDO, E. VAREILLES, M. DJEFEL, C. BARON, G. AURIOL, L. GENESTE et M. ZOLGHADRI. « Vers un couplage de la conception d'un produit avec la planification de son développement ». In : *7th International Conference of Modeling and Simulation, MOSIM 2008*. Paris, France, avr. 2008, p. 1111–1120.
- [Aldanondo+2007] M. ALDANONDO, E. VAREILLES, C. BARON, Y. LAHMAR et L. GENESTE. « Product development and project management ; towards a constraint based approach for co-operation ». In : *International Conference on Industrial Engineering and Systems Management IESM 2007*. Beijing, Chine, mai 2007.
- [Aldanondo+2006] M. ALDANONDO, E. VAREILLES, K. HADJ-HAMOU et G. MOYNARD. « Une approche pour la configuration cohérente de produit et de gamme de production ». In : *Conférence Francophone de Modélisation, Optimisation et Simulation des Systèmes, MOSIM 06*. Rabat, Maroc, 2006.
- [Lamesle+2005] P. LAMESLE, E. VAREILLES et M. ALDANONDO. « Towards a KBS for a qualitative distortions prediction for heat treatments ». In : *International conference on Distortion Engineering, IDE'05*. Bremen, Germany, oct. 2005.
- [Aldanondo+2005] M. ALDANONDO, E. VAREILLES, K. HADJ-HAMOU et P. GABORIT. « Aiding design with constraints : an extension of Quad Tree dealing with piecewise functions ». In : *International Conference on Industrial Engineering and Systems Management IESM 2005*. Marrakech, Maroc, mai 2005.

Configuration Workshop et Journées Francophones de Programmation par Contraintes

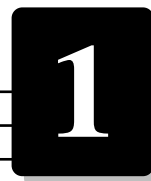
- [Barco Santa+2015a] A.F. BARCO SANTA, E. VAREILLES, P. GABORIT, J.G. FAGES et M. ALDANONDO. « Coupling Two Constraint-Based Systems Into an On-line Facade-layout Configurator ». In : *Workshop on Configuration*. Vienna, Austria, sept. 2015.
- [Barco Santa+2015b] A.F. BARCO SANTA, J.G. FAGES, E. VAREILLES, M. ALDANONDO et P. GABORIT. « Implémentation du problème de calepinage de façades avec Choco-Solveur ». In : *11^e Journées Francophones de Programmation par Contraintes JFPC 2015*. Bordeaux France, juin 2015.
- [Barco Santa+2014a] A.F. BARCO SANTA, E. VAREILLES, M. ALDANONDO, P. GABORIT et M. FALCON. « Calepinage à base de contraintes : application à la rénovation de bâtiments à haute performance énergétique ». In : *10^e Journées Francophones de Programmation par Contraintes JFPC 2014*. Angers, France, juin 2014.
- [Barco Santa+2014b] A.F. BARCO SANTA, E. VAREILLES, M. ALDANONDO et P. GABORIT. « Calpinator : A Configuration Tool for Building Facades ». In : *Proceedings of the 16th International Configuration Workshop, Novi Sad, Serbia, September 25-26, 2014*. 2014, p. 47–54.
- [Pitiot+2013] P. PITIOT, M. ALDANONDO, E. VAREILLES, T. COUDERT et P. GABORIT. « Improving configuration and planning optimization : towards a two tasks approach ». In : *15th International Configuration Workshop*. Vienna Austria, août 2013.
- [Vareilles+2013] E. VAREILLES, C. THUESEN, M. FALCON et M. ALDANONDO. « Interactive configuration of high performance renovation of apartment buildings by the use of CSP ». In : *15th International Configuration Workshop*. Vienna Austria, août 2013.

- [Pitiot+2012] P. PITIOT, M. ALDANONDO, E. VAREILLES et P. GABORIT. « Concurrent configuration and planning problems : Some optimization experimental results ». In : *14th International Configuration Workshop within ECAI 2012*. Montpellier France, août 2012.
- [Vareilles+2012] E. VAREILLES, P. GABORIT, M. ALDANONDO, S. CARBONNEL et L. STEFFAN. « CoFiADe Constraints Filtering for Aiding Design ». In : *8^e Journées Francophones de Programmation par Contraintes JFPC 2012*. Toulouse France, juin 2012.
- [Codet de Boisse+2011] A. CODET DE BOISSE, E. VAREILLES, T. COUDERT, P. GABORIT, M. ALDANONDO et L. GENESTE. « Couplage des approches par contraintes et par analogie : vers une application à la maintenance d hélicoptères ». In : *7^e Journées Francophones de Programmation par Contraintes JFPC 2011 et*. Lyon France, juin 2011.
- [Pitiot+2010] P. PITIOT, E. VAREILLES, M. ALDANONDO, M. DJEFEL et P. GABORIT. « Constraints filtering and evolutionary algorithm for interactive configuration and planning ». In : *12th International Configuration Workshop within ECAI 2010*. Lisboa Portugal, août 2010.
- [Vareilles+2009] E. VAREILLES, C. BELER, E. VILLENEUVE, M. ALDANONDO et L. GENESTE. « Interactive Configuration and Time Estimation of Civil Helicopter Maintenance ». In : *11th International Configuration Workshop within IJCAI 2009*. Pasadena California USA, juin 2009.
- [Aldanondo+2008] M. ALDANONDO, E. VAREILLES, M. DJEFEL et P. GABORIT. « Towards an association of product configuration with production planning ». In : *10th International Configuration Workshop within European Conference on Artificial Intelligence, ECAI2008*. Patras, GREECE, juil. 2008, p. 41–46.
- [Djefel+2008] M. DJEFEL, E. VAREILLES, M. ALDANONDO et P. GABORIT. « Vers le couplage de la conception produit et de la planification projet via une approche par contraintes ». In : *4^e Journées Francophones de Programmation par Contraintes JFPC 2008*. Nantes France, juin 2008.
- [Oudenhove T+2006] van OUDENHOVE T., E. VAREILLES et M. ALDANONDO. « CSP dynamiques en configuration ». In : *Journées Francophones de Programmation par Contraintes JFPC 2006*. Nimes France, juin 2006.
- [Vareilles+2005] E. VAREILLES, K. HADJ-HAMOU, M. ALDANONDO et P. GABORIT. « Extension des QuadTrees pour la représentation et le filtrage des contraintes numériques définies par morceaux ». In : *Journées Francophones de Programmation par Contraintes JFPC 2005*. Lens France, juin 2005.
- [Vareilles+2004] E. VAREILLES, M. ALDANONDO, K. HADJ-HAMOU et P. GABORIT. « Application des techniques CSP pour la configuration d’un traitement thermique particulier ». In : *1^e Journées Francophones de Programmation par Contraintes JFPC 2004*. Angers France, juin 2004.

PARTIE



Activités de recherche et Perspectives



Introduction

Contexte et problématique

Les travaux de recherche présentés dans ce mémoire trouvent leurs fondements dans les constats suivants :

- la durée de vie des produits et systèmes tend à se réduire,
- les conceptions et les actualisations des produits mis sur le marché sont de plus en plus fréquentes alors que les cycles de conception sont toujours plus brefs,
- les technologies employées en constante évolution nécessitent une acquisition de connaissance permanente,
- la diversité des produits offerte sur les marchés ne cesse de croître allant des produits personnalisables ou configurés jusqu'aux produits sur-mesure et conçus à la commande.

Ces tendances et la masse d'informations et de connaissances à traiter en découlant exigent des concepteurs toujours plus d'attention et un travail cognitif toujours plus intense. Il en résulte une augmentation des risques, que le produit réponde imparfaitement aux besoins du demandeur, qu'il soit difficilement réalisable et fabricable, ou encore qu'il le soit à un coût prohibitif. L'objectif de nos travaux est donc de limiter ces risques et erreurs en proposant des outils logiciels et des environnements méthodologiques destinés à capitaliser et exploiter des connaissances générales, contextuelles, académiques, expertes ou métier pour aider la conception.

Les travaux effectués sur différentes problématiques industrielles ont conduit à prendre en considération deux natures de connaissances relevant du « domaine produit » et de la « diversité produit » conduisant à des problématiques industrielles différentes :

- la première nature de connaissance recouvre aussi bien des aspects scientifiques et techniques que des règles métier, elle est nécessaire pour la définition du produit et débouche sur des problématiques d'aide à la conception de produit,
- la seconde nature est une connaissance liée à la diversité des produits, qui débouche sur les problématiques d'aide à la personnalisation ou configuration de produit.

Nous visons à aider un type de conception plutôt « routinier » où de la connaissance de différentes natures et de divers types existe du fait de la récurrence de l'activité. Nous considérons de plus

dans nos travaux que l'aide à la conception ou configuration peut se formaliser, complètement ou partiellement, comme un problème de satisfaction de contraintes (*CSP*). Dans ce cadre, nous nous intéressons plus spécifiquement à l'aide à la décision interactive exploitant les principes de filtrage ou de propagation de contraintes. Notre objectif se décline alors en l'accompagnement des concepteurs dans la construction des solutions répondant au mieux à leurs problèmes, en retirant progressivement de l'espace des solutions, celles qui ne sont plus cohérentes avec les décisions prises, en estimant celles-ci au fil de leur construction et/ou en les optimisant.

Thématiques de recherche

Cet objectif recouvre trois thématiques de recherche.

[T1] Thématique 1 : Formalisation des Connaissances et Contraintes.



Définir des modèles et des architectures de modèles de connaissances en fonction du problème d'aide à la conception visé (produit, procédé, service, définition, validation, évaluation...).

Cette thématique consiste, suite à l'extraction des connaissances, principalement via des interviews d'experts, en leur validation et en leur formalisation sous forme de problèmes de satisfaction de contraintes ou *CSP*. L'association des *CSP* avec des ontologies (projet ANR ATLAS) permet de représenter de manière structurée les connaissances liées à un domaine particulier. La diversité des connaissances à formaliser pour aider à la décision nous conduit à assembler dans un même problème des variables de différents types (discrètes, continues), des contraintes de différents types (tables de compatibilité, fonctions mathématiques, relations temporelles...) et de natures différentes (compatibilité et activation). De nouveaux types de contraintes (contraintes numériques définies par morceaux, projet VHT et contraintes contextuelles par exemple, projet FUI HÉLIMAINTENANCE) doivent parfois être définies afin de répondre à nos besoins de modélisation. Cette thématique fait l'objet du chapitre 3 de ce mémoire.

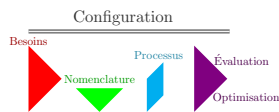
[T2] Thématique 2 : Exploitation des connaissances et Filtrage.



Élaborer, identifier, adapter, assembler des algorithmes de filtrage (*CSP* discrets, continus, mixtes, conditionnels, structurés, géométriques...) et les associer avec d'autres techniques d'aide à la décision (raisonnement à partir de cas, optimisation évolutionnaire...).

Cette thématique de recherche correspond à la conception et au développement d'outils logiciels nécessaires à l'exploitation des modèles de connaissances pour aider à la décision de manière interactive. La diversité des connaissances à exploiter nous conduit à assembler différentes méthodes de filtrage et à intégrer celles-ci dans un moteur de filtrage de plus en plus générique, intégré à notre solution logicielle CoFiADe. Afin d'apporter une aide avisée et enrichie aux concepteurs, nous avons couplé ces méthodes de filtrage d'une part, avec des raisonnements à partir de cas et des algorithmes de *Data-mining* (projet FUI HÉLIMAINTENANCE) afin, par exemple, de présenter aux concepteurs les solutions les plus fréquentes dans un contexte de conception donné, et d'autre part, avec des algorithmes évolutionnaires (projet ANR ATLAS) afin d'optimiser les solutions selon des critères souvent antagonistes. Cette thématique fait l'objet du chapitre 4 de ce mémoire.

[T3] Thématique 3 : Configuration interactive et Extensions.



Coupler le processus de conception de produits à des processus connexes (planification de projet de conception, définition de chaîne logistique, gamme d'assemblage...).

Cette thématique de recherche étend nos propositions de la configuration vers d'autres processus de l'entreprise afin de prendre en compte leur diversité dans le processus de configuration (et inversement) et répondre au mieux, dans un contexte moins routinier, au besoin de diminution des cycles de conception et de préservation de la qualité des systèmes conçus. Pour ce faire, l'activité de configuration ne peut plus être aidée indépendamment des autres activités de l'entreprise : elle doit maintenant tenir compte, en plus du cahier des charges techniques des systèmes, des contraintes techniques ou organisationnelles des autres processus de l'entreprise. Nos travaux de recherche visent à identifier et formaliser ses liens et à répercuter les choix de configuration sur, par exemple, la planification du projet de conception (projet ANR ATLAS), la gamme d'assemblage (projet ADEME CRIBA) ou la constitution de la documentation (projet FUI 2Π-MCO) et inversement. Cette thématique fait l'objet du chapitre 5 de ce mémoire.

Projets de recherche

Durant cette dernière décennie, quatre projets scientifiques (hors projet VHT support de mes travaux de thèse) en partenariat industriel, associés à quatre thèses, ont permis de consolider et de servir de support à nos thématiques de recherche :



V.H.T. Le projet européen VHT (2002-2005), support de mes travaux de thèse [Va-reilles2005], portait sur la configuration d'opérations de traitement thermique, l'identification du type de déformation et l'estimation de l'intensité de distorsion en résultant. Des connaissances métier, expertes ainsi que des connaissances empiriques, formalisées sous forme d'abaques, doivent être exploitées pour estimer l'intensité de distorsion. La première version de CoFiADe a été développée dans le cadre de ce projet, puis enrichie au fil des travaux de recherche et des applications industrielles.



A.T.L.A.S. Le projet ANR ATLAS (2007-2011), et plus particulièrement les thèses de Mme Mériem Djefel [Djefel2010] et de M. Joël Abeille [Abeille2011], nous a permis (1) de coupler la conception de systèmes (avions de tourisme et d'affaire) et la planification du projet de réalisation en proposant deux types de couplage principaux : le couplage structurel et le couplage comportemental, (2) d'associer des *CSP* à des ontologies et des techniques de raisonnement à partir de cas afin d'aider la définition des couples (système, projet), et (3) d'associer des *CSP* à des algorithmes d'optimisation évolutionnaire afin d'identifier, selon des critères de coût global (coût solution et coût projet) et de délai (projet), les solutions Pareto-optimales.



Hélimaintenance Le projet FUI HÉLIMAINTEANCE (2008-2011), et plus particulièrement la thèse de M. Aurélien Codet de Boisse [Codet de Boisse2013], nous a permis d'outiller la configuration des plans de maintenance d'une famille d'hélicoptères en associant des connaissances formelles, générales et législatives (formalisées sous forme de *CSP*) et des connaissances contextuelles, métier et de terrain (exploitées par des raisonnements à partir de cas et des méthodes prédictives issues du *Data-mining*). Les connaissances contextuelles sont utilisées au moment opportun dans le processus de configuration afin de préciser certains

paramètres (le temps estimé d'immobilisation au sol de l'aéronef) dans un contexte bien défini et ainsi conseiller l'utilisateur quant aux choix de valeurs possibles.

C.R.I.B.A.



Rénovation
Bâtiment

Le projet ADEME CRIBA (2013-2015), et plus particulièrement la thèse de M. Andrés Felipe Barco Santa, sert de support à la mise au point d'un outil d'aide à la configuration dédié à la rénovation énergétique de bâtiments. L'ensemble des besoins et contraintes des parties prenantes (architectes, exploitants, fabricants de solutions, usagers. . .) doivent être pris en compte et deux critères de performance (performance thermique et coût complet de la rénovation) doivent être estimés au fil du calepinage des façades rénovées (positionnement et dimensionnement de panneaux posés en façade). Nous associons plusieurs algorithmes de filtrage et de résolution de problème de satisfaction de contraintes afin de permettre aux architectes de dessiner manuellement ou de manière automatique plusieurs solutions de calepinage.

2Π-MCO



Appel d'offres
Cablage Grue

Le projet FUI 2Π-MCO (2014-2015) sert de support, dans le cadre d'un processus de réponse à appel d'offres, à la configuration simultanée des besoins en câblage électrique de grues portuaires, de la nomenclature physique de la solution retenue, du positionnement de ses composants et de la structure de la documentation présentant la réponse à appel d'offres. Une estimation financière de la solution présentée dans la proposition doit, de plus, être réalisée.

La figure 1.1 positionne, sur chacune de nos applications industrielles (après thèse), nos principales contributions thématiques.

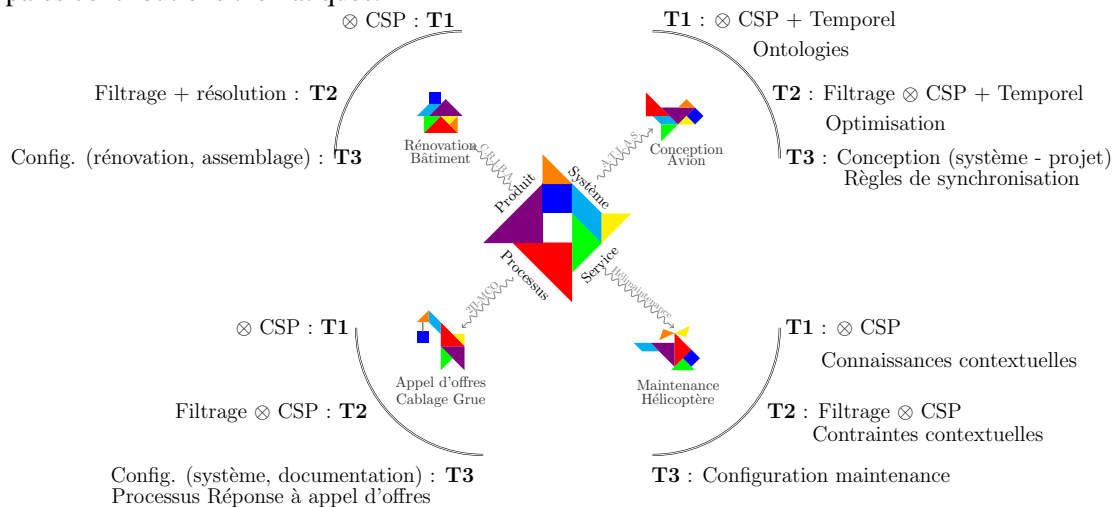


FIGURE 1.1 – Thématiques de recherche et applications industrielles

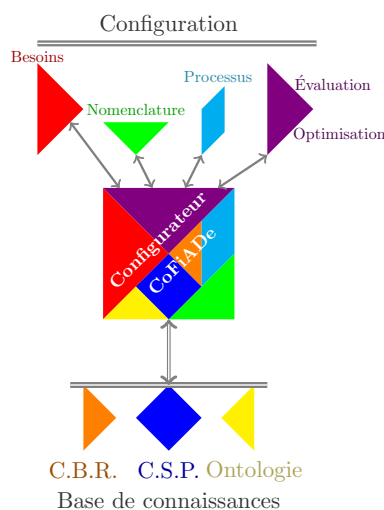
Plan du mémoire

Ce mémoire se décompose en cinq chapitre :

- le chapitre 2 positionne nos travaux de recherche dans le domaine de la configuration interactive de produits. Premièrement, la conception routinière, la configuration et la notion d'interactivité sont définies. Puis, le besoin de formalisation de connaissances à base de contraintes est explicité. L'architecture des configurateurs et les besoins en exploitation sont alors dessinés et recensés. Enfin, l'ensemble de nos travaux de recherche est positionné relativement à ce premier chapitre.
- le chapitre 3 présente les différentes approches utilisées dans nos travaux pour capitaliser et formaliser les connaissances nécessaires à l'activité de configuration : les approches par contraintes ou *CSP* qui permettent une représentation explicite des connaissances générales de formes très diverses (formules, tables, abaque...), les bases de cas qui permettent de capitaliser des connaissances implicites et contextuelles, et les ontologies qui permettent de structurer des connaissances pour un domaine particulier.
- Le chapitre 4 présente les méthodes et algorithmes utilisés pour exploiter ces connaissances afin de réduire progressivement l'espace de solution, par l'utilisation de plusieurs algorithmes de filtrage (interactivité de nos propositions) et la prise en compte simultanée de connaissances contextuelles (enrichissement informationnel). Cet espace des solutions pouvant être encore très grand, même après un nombre important de choix réalisés, seules les solutions Pareto-optimales peuvent être présentées à l'utilisateur afin de l'aider à prendre la meilleure décision au regard de critères à optimiser. Cette recherche de solutions Pareto-optimales est réalisée à l'aide d'un algorithme évolutionnaire sous contraintes.
- Le chapitre 5 présente l'extension de nos travaux de recherche de la configuration de produits aux autres domaines et processus de l'entreprise : par l'ouverture et l'application de nos propositions à la conception « moins routinière » de produits et par la prise en compte dans l'activité de configuration des processus connexes aux systèmes conçus, à savoir leur fabrication, maintenance, assemblage ou documentation. Des règles de synchronisation entre processus sont proposées afin de garantir leur cohérence.
- le chapitre 6 synthétise nos travaux et présente quatre pistes de recherche en découlant. Les deux premières s'inscrivent dans la continuité de nos travaux et concernent, pour la première, la prise en compte des risques projet dans le processus de réponse à appel d'offres et, pour la deuxième, l'optimisation évolutionnaire multi-objectif sous contraintes et méta-heuristique. La troisième piste porte, quant à elle, sur la dynamique des modèles de connaissances (validation et maintenance). La quatrième piste met l'utilisateur au cœur du processus de configuration (explications, dépropagation et préférences).

L'ensemble de nos apports et contributions scientifiques sont positionnés dans leur contexte industriel (projet de recherche), international (collaboration avec des chercheurs étrangers) et scientifique (thèses de doctorat, publications *WoS** et communications avec actes édités).

Contexte et problématiques



Ce chapitre positionne nos travaux dans le cadre des problèmes de conception routinière et plus spécifiquement en configuration interactive de produits. Premièrement, la relation entre conception et configuration est explicitée, la configuration ainsi que la notion d'interactivité sont clarifiées, et les différentes extensions de la configuration à d'autres activités ou processus des entreprises sont présentées. Deuxièmement, les modèles de connaissances, fondements des outils d'aide à la décision, et leur formalisation sous forme de problème de satisfaction de contraintes sont exposés. Troisièmement, l'architecture des configurateurs (outils logiciels supportant l'activité de configuration) et les besoins en exploitation (quelles fonctionnalités sont offertes aux utilisateurs) sont dessinés et recensés. Enfin, nos travaux de recherche sont positionnés relativement à ce contexte.

2.1 Conception et configuration

La conception est une activité qui vise à transformer en objet réalisable un ensemble de besoins et d'exigences exprimés par un client. BROWN et CHANDRASEKARAN considèrent la conception comme une activité de résolution de problème dont les données d'entrée comprennent [Brown+1989] :

- la liste des fonctions que doit accomplir l'objet à concevoir ; ces fonctions sont celles exprimées par le client ainsi que celles qui sont implicitement propres au domaine,
- un ensemble de contraintes qui doivent être satisfaites par ce même objet ; les contraintes peuvent porter sur les paramètres de définition de l'objet ou sur son processus de réalisation,
- un ensemble de composants prédéfinis et un ensemble de relations reliant ces différents composants.

BROWN et CHANDRASEKARAN définissent la solution du problème de conception comme une spécification complète de l'ensemble des composants ainsi que des relations les reliant. Cette spécification décrit l'objet solution qui accomplit toutes les fonctions et vérifie toutes les contraintes. Le plus souvent, cette solution est choisie parmi un ensemble d'alternatives suivant différents critères d'évaluation (performance, coût. . .).

Suivant cette définition, l'activité de conception consiste à répondre à un ensemble de besoins et d'exigences décrites sous la forme de fonctions et de contraintes. La réponse est donnée sous la forme d'un ensemble de composants réalisant ces fonctions. La norme AFNOR [AFNOR1988] complète cette définition avec la notion de connaissances nécessaires à la conception. La conception est définie comme une activité créative qui, partant des besoins exprimés et des connaissances existantes, aboutit à la définition d'un produit satisfaisant ces besoins.

Cette notion de connaissance en conception est importante, car elle permet de typer les problématiques de conception. Trois types de connaissances ont été identifiés par BROWN et CHANDRASEKARAN : la connaissance sur le domaine de l'objet à concevoir, la connaissance sur la démarche ou la manière de concevoir et la connaissance sur les besoins à l'origine du problème de conception [Brown+1989]. Suivant la présence plus ou moins significative de ces trois types de connaissances, BROWN et CHANDRASEKARAN identifient trois types de conception, la conception routinière, la conception innovante et la conception créative.

La configuration, encore appelé *customisation* ou *personnalisation* [Anderson+1996], [Pine1999], correspond au cas extrême de la conception routinière où l'ensemble des trois types de connaissances est disponible [Sabin+1998], [Stumptner1997]. La configuration fait l'hypothèse que l'espace des solutions a été totalement étudié et décrit. Il en résulte une connaissance exhaustive de l'espace des solutions permettant la description de l'ensemble des solutions admissibles.

Le tableau 2.1 présente les connaissances disponibles suivant le type de conception considérée ainsi que le caractère exhaustif de leur espace des solutions. Une revue de littérature complète sur la configuration peut être trouvée dans le *Knowledge-based Configuration : From Research to Business Cases* version 2014 [Felfernig+2014].

TABLE 2.1 – Conception, Connaissances et espace des solutions

Type de conception	Besoins	Domaine	Démarche	espace des solutions
Créative	oui	non	non	inconnu
Innovante	oui	oui	non	partiellement connu
Routinière	oui	oui	oui	quasiment connu
Configuration	oui	oui	oui	totalement connu

Nos travaux se situent dans le cadre des problèmes de conception routinière et plus spécifiquement en configuration interactive de produits.

2.2 Configuration Interactive : Définitions et Extensions

L'une des premières définitions du problème de configuration, en complète cohérence avec la définition de la conception proposée par BROWN et CHANDRASEKARAN, remonte aux travaux de SABIN et WEIGEL [Sabin+1998].

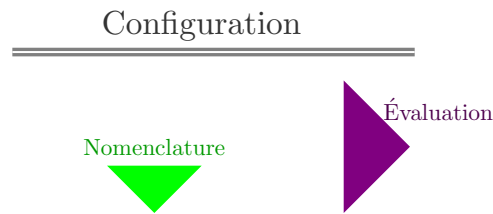


FIGURE 2.1 – Objets de la configuration : Nomenclature et Évaluation

Définition 1 : Configuration

Étant donné :

- un ensemble fixe et prédéfini de composants A , où un composant est décrit par un ensemble de propriétés, des « ports » pour le relier à d'autres composants, des contraintes sur chaque port pour décrire les composants qui peuvent s'y connecter et des contraintes structurelles,
- une description de la configuration désirée B ,
- et éventuellement des critères pour faire une sélection optimale C ,

configurer consiste à trouver au moins une configuration (ou solution) qui réponde à toutes les exigences, où une configuration est un ensemble de composants et une description de leurs connexions, sinon détecter des incohérences dans les conditions A , B et C .

Cette définition de la configuration est axée essentiellement sur les problèmes de choix de composants physiques et donc sur la constitution de la nomenclature physique du produit, tel qu'illustré en figure 2.1. Reprise par de nombreux auteurs comme SABIN et FREUDER [Sabin+1996], SABIN et WEIGEL [Sabin+1998] ou SOININEN [Soininen1999], elle fait apparaître implicitement la notion de modèle générique (ensemble de composants, propriétés et connexions possibles) qui, lorsqu'il est superposé à une configuration partielle désirée (un ensemble de quelques composants clés souhaités par le client), permet d'obtenir le produit configuré spécifique au client.

Définition 2 : Configuration interactive

La configuration interactive est un processus itératif qui consiste à retirer de l'espace des solutions, des solutions qui ne sont plus cohérentes avec les choix réalisés par l'utilisateur et le modèle générique. Par un processus itératif, l'utilisateur spécifie progressivement ses besoins et converge progressivement vers une/des solution(s) satisfaisant ses besoins.

Des auteurs comme TIIHONEN, SOININEN, MÄNNISTÖ et SULONEN [Tiihonen+1996], VERON [Veron2001] et HVAM, RIIS et MALIS [Hvam+2002] ont étendu cette définition première de la configuration en incluant les besoins client et le processus de réalisation ou production. Dans ce courant de travaux, TIIHONEN, SOININEN, MÄNNISTÖ et SULONEN distinguent trois niveaux de configuration [Tiihonen+1996], comme illustré en figure 2.2 :

- le premier est une forme de configuration fonctionnelle du besoin client (*Sales Specification* ou nomenclature fonctionnelle),
- le deuxième correspond à la configuration physique de la nomenclature (*Description of Product Instance*) respectant les fonctions et besoins du niveau précédent,
- le troisième permet la configuration du processus de production (*Component Manufacturing Specification*).

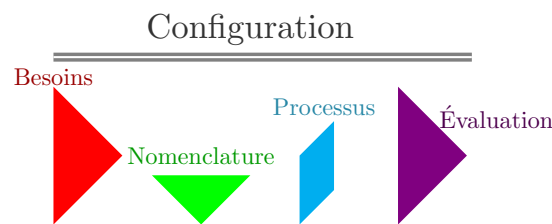


FIGURE 2.2 – Objets de la configuration : Besoins, Nomenclature, Process et Évaluation

Le principe de ces approches est de disposer d'un modèle générique par niveau de configuration. Ces trois modèles représentent toutes les options et variantes pour configurer les besoins clients, les nomenclatures physiques et les processus de production.

L'activité globale de configuration peut alors se scinder en trois étapes successives, mettant en œuvre des connaissances différentes et donc des acteurs différents : vendeur, concepteur, producteur par exemple. Par contre, la notion d'approche descendante ou de décomposition d'un composant en plusieurs composants, mise en évidence en conception dans l'*Axiomatic Design* [Suh1990], [GoncalvesCoelho2004], est beaucoup moins présente en configuration. Quelques travaux, [Sabin+1996] et [Veron2001] entre autres, se sont intéressés à cet aspect et ont montré qu'il ne soulevait pas de difficultés particulières.

Nous considérons, dans nos travaux, l'ensemble de ces extensions afin d'élargir la configuration de produit aux autres activités et processus de l'entreprise, comme présenté dans le chapitre 5.

2.3 Modèle de connaissances et Contraintes

HVAM, RIIS et MALIS proposent une approche visant à définir un processus global de configuration incluant les activités permettant l'obtention des modèles génériques nécessaires à la configuration [Hvam+2002]. Ces activités correspondent d'une part à l'identification, l'analyse et la validation des connaissances du domaine (c'est-à-dire la liste de toutes les options, variantes et interdépendances) et, d'autre part, à leur formalisation pour permettre leur exploitation lors de la configuration et leur maintenance ultérieure.

Le modèle générique est, en effet, un concept clé en configuration. Il représente l'ensemble de toutes les options et variantes d'un produit incluant leurs compatibilités et/ou incompatibilités et contient toute la connaissance caractérisant la diversité de ce produit.

Il est important de noter que l'élaboration des modèles génériques pour la configuration est un travail critique, car il engage et définit la diversité proposée à l'utilisateur. Cela nécessite de définir des notions de familles de produits et de faire converger les préoccupations des vendeurs, des concepteurs et des producteurs [Hvam+2014]. De plus, cette activité de modélisation est récurrente car une fois modélisée, il est important de noter que la diversité (liée aux besoins, solutions, procédés) évolue sans cesse du fait de nouvelles attentes et de nouvelles technologies.

Les problèmes de satisfaction de contraintes ou *CSP* sont très souvent utilisés en configuration pour formaliser les connaissances sous forme de modèles génériques, tant en recherche que dans l'industrie [Felfernig+2014]. Les problèmes de satisfaction de contraintes formalisent les connaissances sous forme de variables, chacune associée à un domaine de définition et reliées entre elles par des contraintes, limitant les combinaisons de valeurs autorisées et permettant ainsi de décrire de manière exhaustive l'espace des solutions. Les *CSP* présentent plusieurs avantages :

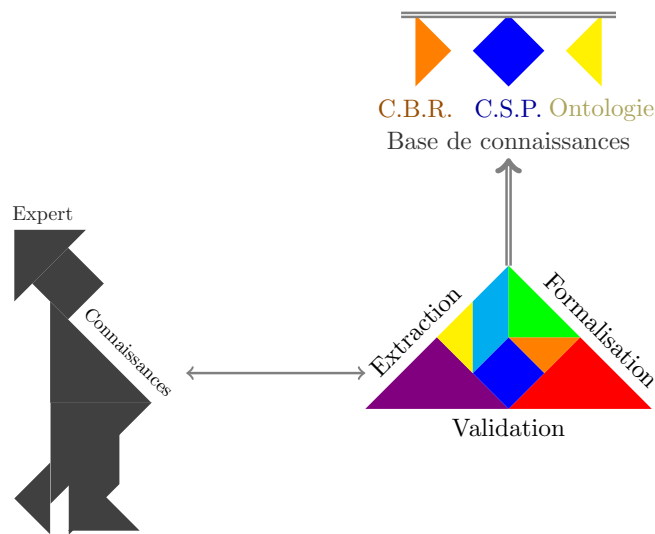


FIGURE 2.3 – Modèles génériques et CSP

- une grande liberté de modélisation des connaissances (compatibilités entre composants, formules mathématiques d'évaluation, etc),
- la non-orientation du raisonnement : toute variable présente dans le problème est à la fois variable d'entrée (pouvant être restreinte par l'utilisateur) ou de sortie (résultant d'un calcul, par exemple),
- une séparation claire entre les modèles de connaissances et leur exploitation (traitement algorithmique)
- les combinaisons ou couplages possibles avec d'autres approches de capitalisation des connaissances, et plus particulièrement avec les raisonnements à partir de cas ou *CBR*, *Data-mining* et les ontologies.

Nos travaux ne portent pas sur les aspects d'extraction et de validation de connaissances, à proprement parler, mais sur leur formalisation sous forme de problèmes de satisfaction de contraintes, comme illustré en figure 2.3. La diversité des connaissances à formaliser nous conduit à coupler les *CSP* avec d'autres approches de capitalisation et structuration des connaissances. Ces travaux font l'objet du chapitre 4 de ce mémoire.

2.4 Configurateurs et Besoins utilisateurs

Il est maintenant possible de définir ce qu'est un configurateur ou progiciel de configuration. La plupart des auteurs, comme TIIHONEN et SOININEN [Tiihonen+1997] ou MOYNARD [Moynard2003], définissent le configurateur comme un progiciel, qui aide l'activité de configuration. Sans préjuger de la technique informatique employée, il est toujours composé :

- d'une base de connaissances où sont stockés les modèles génériques,
- éventuellement d'un module aidant la saisie du modèle générique,
- d'un module aidant l'activité de configuration, c'est-à-dire l'instanciation du modèle générique conformément aux besoins client.

Il est possible de se référer à l'ouvrage *Knowledge-Based Configuration : from research to business cases* [Felfernig+2014] pour un aperçu exhaustif des progiciels existants actuellement sur le marché.

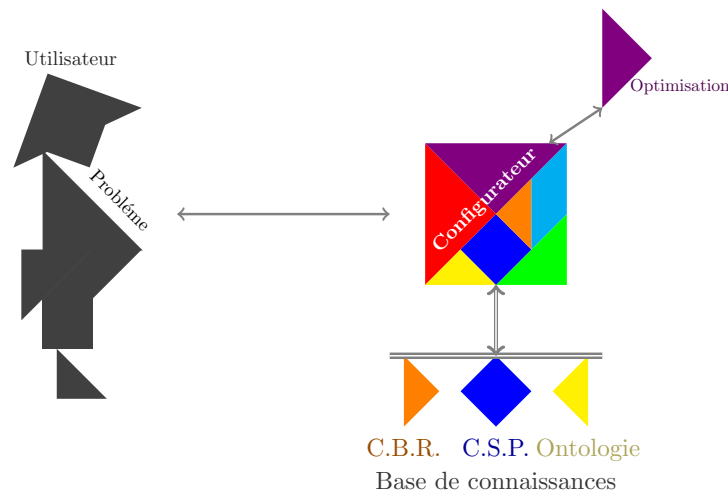


FIGURE 2.4 – Architecture d'un configurateur

Un configurateur permet à un utilisateur de parcourir l'espace des solutions, décrit par un modèle générique, en lui offrant la possibilité de :

- visualiser la solution en cours de configuration de manière pertinente en ne présentant que les composants, variantes et options effectivement présents dans la solution,
- exprimer ses préférences sur les composants, variantes et options, telles que le choix d'une valeur unique, choix d'ensemble de valeurs, exclusion d'un ensemble de valeurs ou bien l'expression de préférences explicitement entre valeurs,
- d'estimer la solution en cours de configuration selon plusieurs critères parfois antagonistes, tels que le coût ou la performance,
- d'exprimer ses contraintes quant aux critères d'évaluation, comme par exemple, limiter le coût de la solution et par conséquent limiter le choix d'options et de variantes,
- optimiser les solutions sur les critères d'évaluation, comme par exemple la minimisation du coût et la maximisation de la performance.

Nous tenons à souligner que nombre de configurateurs commerciaux présents sur Internet ne présentent pas l'ensemble de ces fonctionnalités. Ils se limitent généralement à :

- la sélection d'une et une seule valeur pour les différentes variantes,
- la sélection (et parfois désélection) d'options cohérentes avec les besoins exprimés et la configuration courante,
- l'évaluation des critères au fil de la configuration.

Nos travaux de recherche s'orientent, d'une part, sur les mécanismes d'exploitation de la connaissance formalisée sous forme de contraintes par l'utilisation de plusieurs méthodes de filtrage (garantes de l'interactivité du configurateur) et, d'autre part, sur l'interaction avec l'utilisateur en termes d'expression de ses besoins et de visualisation des solutions. Nos travaux n'incluent pas, à ce jour, de module spécifique aidant la saisie du modèle générique. Cependant, nous avons défini un langage de modélisation spécifique permettant de formaliser des connaissances sous la forme d'un CSP [Vareilles+2012c].

2.5 Positionnement de nos travaux

Nos travaux de recherche se positionnent :

- en configuration interactive de produits en couvrant un large spectre de leur cycle de vie : de la configuration des besoins et de la nomenclature physique à la configuration des différents processus connexes tels que la fabrication, le montage, la maintenance et la documentation,
- sur l'ensemble du processus de configuration, de la formalisation des connaissances à leur exploitation.

Nos travaux de recherche s'appuient sur :

- des approches à base de contraintes couplées, si besoin, à des ontologies et des bases de cas,
- différentes méthodes de filtrage des contraintes afin d'exploiter la connaissance formalisée et garantir l'interactivité,
- des approches d'optimisation et de raisonnements à partir de cas et de *Data-mining* afin d'offrir aux utilisateurs une aide enrichie et originale,
- le tout aidé par notre solution logicielle à base de contraintes CoFiADe intégrant l'ensemble de nos propositions.

La figure 2.5 synthétise le contexte et les problématiques de nos travaux.

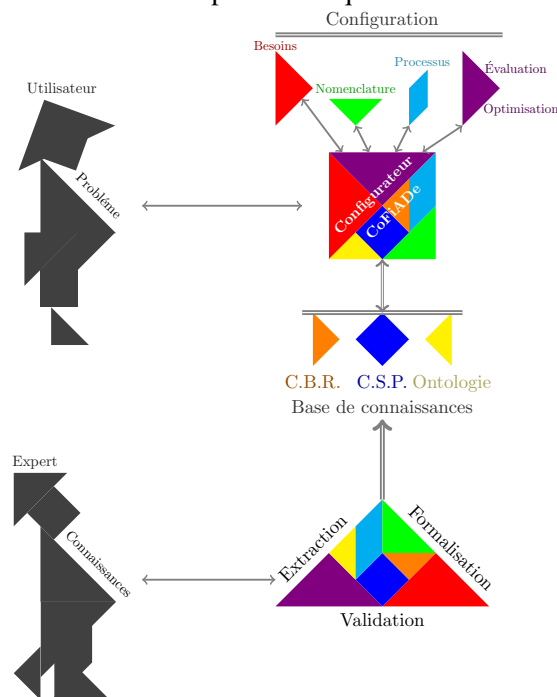
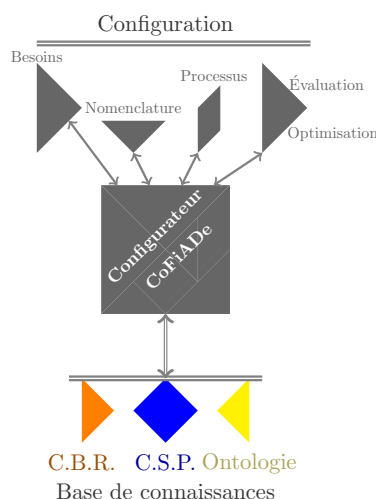


FIGURE 2.5 – Contexte et Problématiques

Formalisation des Connaissances et Contraintes



Les bases de connaissances sont indispensables aux outils de configuration et plus généralement aux outils d'aide à la décision à base de connaissances. C'est, en effet, sur les connaissances qu'elles contiennent que se base l'ensemble des raisonnements conduisant l'utilisateur à prendre une bonne ou la meilleure décision. Dans nos travaux de recherche, nous considérons deux types de connaissances : une connaissance dite générale, car valide pour un grand nombre de situations variées, et une connaissance plus contextuelle, pertinente et exploitable pour un nombre plus réduit de situations spécifiques. Ces deux types de connaissances sont exploitées en complémentarité afin de fournir aux utilisateurs une aide enrichie et originale.

Dans nos travaux, les connaissances générales, de forme et de nature très variées, sont formalisées à l'aide de problèmes de satisfaction de contraintes ou *CSP*, tandis que les connaissances contextuelles sont formalisées à l'aide de cas, regroupés dans des bases, exploitables par des raisonnements à partir de cas ou *CBR* et des algorithmes de *Data-mining*. Ces deux types de connaissances peuvent être structurées sous forme d'ontologie de concepts afin de faciliter leur exploitation dans des situations moins routinières et leur maintenance [Coudert2014], mais seule la structuration des connaissances générales est abordée dans ce mémoire.

Les connaissances générales étant valides dans un grand nombre de situations, nous privilégions leur utilisation. Deux contraintes spécifiques sont proposées afin, d'une part, de formaliser des connaissances générales empiriques (abaques ou fonctions par morceaux) et, d'autre part, d'injecter les connaissances contextuelles au moment opportun dans le processus de configuration et aider ainsi l'utilisateur dans sa prise de décision.

Premièrement, ce chapitre présente de manière succincte les approches par contraintes, support de la formalisation des connaissances générales dans nos travaux. Les concepts de variables et

contraintes ainsi que les différents types de *CSP* sont définis. Deuxièmement, nos apports et contributions scientifiques, relatifs à la formalisation et structuration des connaissances, sont positionnés dans leur contexte industriel (projet de recherche), international (collaboration avec des chercheurs étrangers) et scientifique (thèses de doctorat, publications *WoS** et communications avec actes édités).

3.1 Problèmes de satisfaction de contraintes

Nous présentons dans cette section les problèmes de satisfaction de contraintes qui nous permettent de formaliser les connaissances générales nécessaires à l'activité de configuration. Dans un premier temps, nous définissons formellement les problèmes de satisfaction de contraintes et précisons les types et les natures des variables et contraintes qu'ils recouvrent. Dans un deuxième temps, nous passons en revue les différents types de problèmes de satisfaction de contraintes : nous les classons en fonction du type de leurs contraintes et de la nature de celles-ci mais aussi de la *pertinence* des variables dans le problème et la solution.

3.1.1 Définition d'un *CSP*

Les problèmes de satisfaction de contraintes ou *CSP* (*Constraint Satisfaction Problems*) permettent de modéliser de la connaissance et de raisonner sur celle-ci afin de trouver l'ensemble des solutions compatibles avec un problème courant. Les premiers problèmes de satisfaction de contraintes ont été définis par MONTANARI [Montanari1974].

Définition 3 : *Problème de satisfaction de contraintes*

Un problème de satisfaction de contraintes est défini comme un triplet $(\mathbb{V}, \mathbb{D}, \mathbb{C})$ où :

- $\mathbb{V} = \{v_1, v_2, \dots, v_k\}$ est un ensemble fini de variables,
- $\mathbb{D} = \{d_1, d_2, \dots, d_k\}$ est un ensemble fini de domaines de définition des variables,
- $\mathbb{C} = \{c_1, c_2, \dots, c_m\}$ est un ensemble fini de contraintes portant sur les variables où une contrainte décrit les combinaisons autorisées ou exclues des valeurs des variables.

Formaliser des connaissances générales sous forme de *CSP* revient à traduire celles-ci soit sous forme d'élément unique de \mathbb{C} , soit sous forme de plusieurs éléments répartis sur le triplet $(\mathbb{V}, \mathbb{D}, \mathbb{C})$ [Vernat2004] [Vareilles2005]. C'est le niveau d'abstraction de la connaissance qui va déterminer si celle-ci est directement utilisable sous la forme d'une contrainte, ou si elle doit être décomposée.

Le modèle de connaissances est alors confondu avec le problème de satisfaction de contraintes.

Définition 4 : *Solution d'un CSP*

Une solution d'un problème de satisfaction de contraintes est une instantiation de toutes les variables \mathbb{V} respectant toutes les contraintes \mathbb{C} .

Trouver une ou les solutions d'un problème donné revient à résoudre le problème de satisfaction de contraintes.

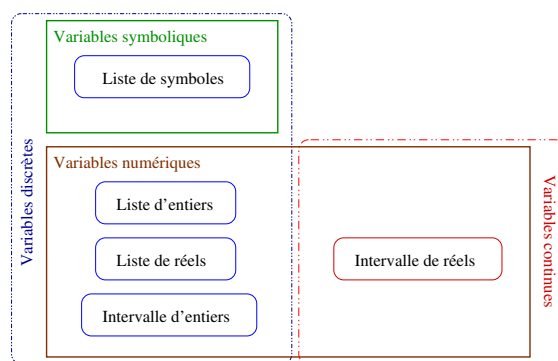


FIGURE 3.1 – Classification des variables

3.1.2 Variables et Contraintes

Les variables sur lesquelles s'appliquent les contraintes peuvent être de types différents : symboliques ou numériques, discrètes ou continues. Il existe deux manières de cartographier l'ensemble des variables [Vareilles2005]. La figure 3.1 présente cette cartographie en fonction du type des éléments des domaines et de leur cardinal.

Si nous considérons uniquement le genre des éléments des domaines de définition, nous obtenons deux sous-ensembles disjoints : les variables symboliques (en vert) et les variables numériques (en marron). Si nous considérons la cardinalité des domaines de définition (dénombrable ou non), nous obtenons deux sous-ensembles disjoints : les variables discrètes (en bleu) et les variables continues (en rouge).

Les contraintes permettent d'une part, de restreindre l'espace de solution en délimitant les combinaisons de valeurs que les variables peuvent prendre simultanément (elles sont dans ce cas qualifiées de *compatibilité*), et d'autre part, de modifier la structure de l'espace de solution (ou du *CSP*) en ajoutant ou retirant des éléments (variables et contraintes) au problème en cours de résolution (elles sont dans ce cas qualifiées d'*activation*) [Mittal+1990]. Les contraintes d'activation permettent de gérer la *pertinence* des éléments du problème (variables et contraintes) par un mécanisme d'activation implicite ou non de ceux-ci [Van Oudenhove de Saint G ry2006].

La diversité des connaissances à formaliser amène à définir des types de contraintes différents [Yannou1998] : des tables de compatibilités représentant sous forme tabulaire des listes de n -uplets de valeurs autorisées, des fonctions numériques de \mathbb{R}^n dans \mathbb{R} où ($n + 1$) représente l'arité de la contrainte¹ ou encore des fonctions numériques continues et définies par morceaux, permettant de prendre en compte des connaissances empiriques ou des résultats expérimentaux formalisés sous forme d'abaques [Mulyanto2002] [Vareilles2005], [Chenouard2007].

La figure 3.2 synthétise notre classification des contraintes, selon leur nature (compatibilité ou activation) et leur type (tables de compatibilité, fonctions numériques et abaques).

3.1.3 Classification des CSP

Les problèmes de satisfaction de contraintes peuvent être classés selon plusieurs critères : le type de variables sur lesquels ils portent (symbolique, continue, temporelle...) [Gelle+2003], le type de contraintes présentes (liste de valeurs autorisées, fonction mathématique et relation temporelle)

1. L'arité d'une contrainte représente le nombre de variables distinctes sur lesquelles elle agit.

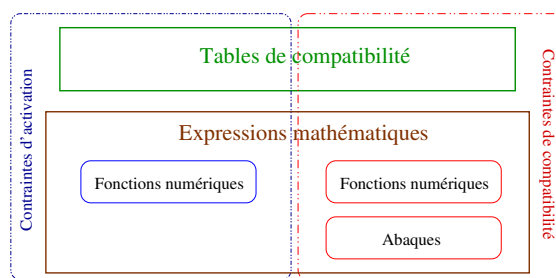


FIGURE 3.2 – Classification des contraintes

[Vareilles2005], et sur la nature des contraintes mises en jeu (contrainte de compatibilité et contrainte d'activation) [Djefel2010], [Felfernig+2014].

Nous proposons de compléter la classification de DJEFEL et FELFERNIG, HOTZ, BAGLEY et TIIHONEN par la notion de *pertinence des variables dans la solution*. Pour cela, rappelons d'abord les notions de CSP à structure statique et à structure dynamique. Les CSP à structure statique sont des CSP dans lesquels la totalité des variables \mathbb{V} et la totalité des contraintes \mathbb{C} caractérisent l'ensemble des solutions. Aucune variable, ni contrainte n'est rajoutée au fil de la résolution du problème. Les CSP à structure dynamique sont des CSP dont la structure peut être modifiée par l'ajout de variables et de contraintes supplémentaires au fil de la résolution du problème.

De manière similaire, nous pouvons distinguer les solutions à structure statique qui sont décrites par l'ensemble des variables de \mathbb{V} du CSP. A contrario, les solutions à structure dynamique, soit, ne contiennent qu'un sous-ensemble des variables de \mathbb{V} , alors que celles-ci sont présentes dans le CSP, soit voient leur structure évoluer dans le temps par l'ajout ou le retrait de variables les décrivant, de manière identique au CSP.

Trois cas sont alors différenciés, la quatrième combinaison (CSP statique et Solution dynamique) n'ayant aucun sens, tel qu'illustré en figure 3.3 :

- CSP statique et Solution statique :
 - CSP discrets : premier type de CSP, définis par [Montanari1974] caractérisés par des variables discrètes et des contraintes de compatibilité décrites par des listes de combinaisons de valeurs autorisées ou interdites [Tsang1993] et par des expressions mathématiques discrètes.
 - CSP continus : extension des CSP discrets au domaine continu, caractérisés par des variables numériques continues et des contraintes décrites de manière générale comme des fonctions mathématiques, et plus rarement par des contraintes de compatibilité continues.
 - CSP temporels *qualitatifs* ou *quantitatifs* : caractérisés par des variables temporelles représentant respectivement soit des intervalles temporels [Allen1983], soit des instants ou événements [Dechter+1991] et par des contraintes temporelles représentant des relations temporelles entre intervalles ou instants. MEIRI [Meiri1996] a proposé de combiner ces deux types de CSP temporels pour augmenter leur expressivité.
 - CSP mixtes : caractérisés par des variables de différents types et des contraintes de compatibilité discrètes, continues, temporelles ou mixtes [Gelle+1995], [Vareilles2005].
- CSP statique et Solution dynamique :

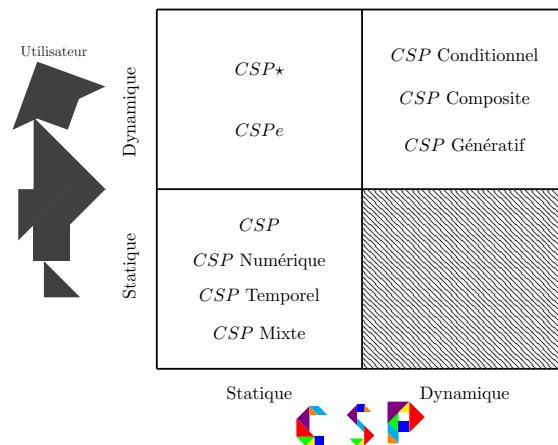


FIGURE 3.3 – Classification des CSP

- CSP^* : caractérisés par des variables discrètes qui possèdent, pour certaines, la valeur $*$ dans leur domaine (variables optionnelles) et des contraintes de compatibilité tenant compte de la valeur spécifique $*$ [Amilhastre1999], [McDonald+2002].
- CSP à états : caractérisés par des variables discrètes associées, pour certaines, à une variable booléenne d'état indiquant la pertinence de la variable dans la solution et des contraintes de compatibilité tenant compte de ces variables d'état [Veron2001].
- CSP dynamique et Solution dynamique :
 - CSP conditionnels : caractérisés par des variables discrètes actives ou inactives dans le problème et des contraintes de compatibilité et d'activation gérant de manière explicite la pertinence de variables dans le problème, en autorisant ou en interdisant explicitement leur activation suivant quatre types de contraintes d'activation [Mittal+1990]. Les CSP conditionnels ont été étendus aux variables numériques [Gelle+1995], à l'activation de sous-ensembles de variables [Soininen+1999], à l'activation explicite de contraintes [Vareilles2005], ainsi qu'aux CSP temporels [Tsamardinos+2003], [Vilim+2004], [Mouhoub+2005].
 - CSP composites : caractérisés par des variables discrètes dont certaines sont des méta-variables pouvant être substituées par un sous-problème entier (variables et contraintes) et des contraintes de compatibilité et d'activation [Sabin+1996]. Les CSP composites ont été introduits principalement pour modéliser la structure hiérarchique des problèmes de configuration et ont été étendus aux CSP temporels par [Mouhoub+2005].
 - CSP génératifs : dédiés à la configuration de produits, caractérisés par des variables discrètes représentant des propriétés, des ports et des composants, liées entre elles par des contraintes génériques de compatibilité ou d'activation. Les $GCSP$ sont, par nature, hiérarchiques [Stumptner+1998].

Une revue de littérature complète sur le CSP peut être trouvée dans le *Handbook of Constraint Programming* version 2006 [Rossi+2006].

3.2 Apports et Contributions Scientifiques

Dans le cadre de nos travaux de recherche, nous sommes confrontés à une large diversité de connaissances à formaliser sous forme de problèmes de satisfaction de contraintes. Cette diversité

nous conduit à assembler dans un même modèle de connaissances plusieurs types de *CSP*, à associer ces modèles à des ontologies de concepts afin de mieux les structurer mais aussi à proposer deux nouveaux types de contraintes : les contraintes définies par morceaux et les contraintes contextuelles.

Ce chapitre présente l'ensemble de ces contributions en les positionnant dans leur contexte industriel, scientifique (thèses de doctorat, articles *WoS** et communications avec actes édités) et international.

3.2.1 Configuration et *CSP*



Afin de formaliser la connaissance nécessaire à la constitution des modèles de connaissances, nous assemblons dans un même modèle générique différents types de variables et de contraintes.

Dans nos travaux de recherche, nous considérons une grande partie du cycle de vie des produits. Le processus de configuration porte tout autant sur les produits ou systèmes que sur leurs processus connexes (*CSP* discrets, continus, mixtes, temporels) : projet de réalisation, processus de montage, de maintenance, etc, objet du chapitre 5. L'aspect hiérarchique et optionnel des entités manipulées (composants, tâches, activités) doit être considéré afin de ne proposer à l'utilisateur que les variables pertinentes constituant sa solution (*CSP* conditionnels). Les solutions résultant du processus de configuration sont toutes estimées sur des critères variés (*CSP* mixtes pour lier les composants de la nomenclature physique aux critères d'évaluation et continus pour calculer les critères de manière globale sur la solution) : coût physique de la solution, temps d'immobilisation au sol, coût et durée du processus (ou projet) de réalisation...

Nous présentons, dans cette section, de manière chronologique, une synthèse des différents types de *CSP* utilisés dans chacune de nos applications industrielles :



Le projet européen VHT (2002-2005), support de mes travaux de thèse [Vareilles2005], portait sur la configuration d'opérations de traitement thermique et l'estimation des distorsions en résultant. Dans le cadre de ce projet, quatre types de *CSP* ont été utilisés :

- les *CSP* discrets pour formaliser les paramètres discrets du procédé de traitement thermique : type d'acier, type de fluide de trempe, température de chauffe, etc
- les *CSP* numériques pour estimer les intensités de déformations : multiplication d'attributs de déformation spécifiques à chaque type de déformation (bobine-tonneau, ovalisation, ...) par des attributs de modulation,
- les *CSP* mixtes pour relier les paramètres descriptifs du processus aux intensités de déformations et aux attributs de modulation,
- les *CSP* conditionnels permettant la description géométrique de la pièce (épaulement, trou débouchant, etc) et l'activation des types de déformations (parapluie, ovalisation, ...).

Le modèle complet de connaissances est présenté dans [Aldanondo+2005b], [Aldanondo+2006a], [Aldanondo+2006d], [Aldanondo+2006b].



Le projet ANR ATLAS (2007-2011), support des travaux de thèse de Mme M. Djefel [Djefel2010] et de M. J. Abeille [Abeille2011], portait sur le couplage entre les processus de conception de systèmes et de planification du projet de conception.

Dans le cadre de ce projet, cinq types de *CSP* ont été utilisés :

- les *CSP* discrets, numériques et mixtes pour formaliser les connaissances en conception (nombre de siège de l'avion, type de longeron, ...), estimer le coût du couple (solution, projet de réalisation) et relier des variables de conception aux variables de planification et ainsi coupler ces deux domaines,
- les *CSP* conditionnel permettant la description de la nomenclature physique (hiérarchie de composants) et l'architecture du projet de réalisation (hiérarchie de tâches),
- les *CSP* temporels quantitatifs pour planifier le projet de réalisation au plus tôt, à capacité infinie de ressources, et estimer sa durée.

Ces travaux ont été valorisés dans [Vareilles+2007b], [Abeille+2010]. Ces travaux ont été prolongés par une collaboration avec L. Zhang, professeur à l'*University of Groningen* Pays Bas, en 2012 et ont débouché sur la publication d'un article [Zhang+2013]* et une conférence avec actes édités [Zhang+2012a].



Le projet FUI HÉLIMAINTENANCE (2008-2011), support des travaux de thèse de M. A. Codet de Boisse [Codet de Boisse2013], portait sur la configuration de la maintenance d'hélicoptères civils afin de minimiser leur temps d'immobilisation au sol. Dans le cadre de ce projet, quatre types de *CSP* ont été utilisés :

- les *CSP* discrets, numériques et mixtes pour formaliser les connaissances en maintenance (caractéristiques de l'appareil, cycle de vie de maintenance des pièces, type de maintenance, ...) et estimer le temps d'immobilisation de l'appareil,
- les *CSP* conditionnels permettant la description de la nomenclature physique (hiérarchie de composants) et la structure du processus de maintenance associée (hiérarchie d'activités).



Le projet ADEME CRIBA (2012-2015), support des travaux de thèse de M. A.-F. Barco Santa porte sur la configuration de rénovation de bâtiments par l'extérieur à partir de panneaux préfabriqués configurables. Dans le cadre de ce projet, quatre types de *CSP* sont utilisés :

- les *CSP* discrets, numériques et mixtes pour formaliser les connaissances en rénovation, le principe constructif utilisé (hauteur, largeur, poids des panneaux) et estimer le coût et la performance énergétique de la solution de rénovation,
- les *CSP* conditionnels permettant la description de la nomenclature physique de la rénovation (hiérarchie de composants) et la description du processus de montage associée (hiérarchie d'activités).

Ces travaux ont été valorisés dans [Vareilles+2013a], [Barco Santa+2014b], [Barco Santa+2014a], [Barco+2015]. Ces travaux ont été menés en partenariat avec le département de *Production and Service Management* du *Danmarks Tekniske Universitet*, Denmark et ont donné lieu à un article de *workshop* avec le Docteur C. Thuesen [Vareilles+2013b]. Ce partenariat nous a conduit à passer 2 mois en 2015 au *Danmarks Tekniske Universitet*, Denmark, pour, d'une part, identifier les liens entre la conception modulaire et la configuration de produits, et d'autre part, identifier les techniques de représentation sous forme graphique (UML) des connaissances avant leur formalisation sous forme de *CSP*, ce travail ayant été mené avec le Professeur L. Hvam.



Le projet FUI 2II-MCO (2014-2015) porte sur la configuration de réponse à appel d'offres pour le câblage électrique de grues portuaires tant du point de vue de la solution que de sa documentation. Dans le cadre de ce projet, quatre types de *CSP* sont utilisés :

- les *CSP* discrets, numériques et mixtes pour formaliser les connaissances des composants de câblage (compatibilité des composants, positionnement) et estimer le coût de la solution,

- les *CSP* conditionnels permettant la description de la nomenclature physique de la solution et celle de la documentation associée (hiérarchie de sections, sous-sections, ...).

3.2.2 Contraintes et Ontologies



Afin de faciliter la réutilisation, le partage des connaissances et la maintenance des modèles génériques, nous associons les problèmes de satisfaction de contraintes à des ontologies. [Neumann1988] et [Soininen+1998] ont introduit la notion d'ontologie en configuration afin de faciliter la réutilisation et le partage des connaissances. Une ontologie est « la spécification d'une connaissance explicite à propos d'une conceptualisation [Gruber1993], [Heijst+1997]. Elle permet de préciser les concepts utilisables pour décrire les connaissances, les relations possibles entre les concepts et, éventuellement, les contraintes d'utilisation [Valente+1996], [Dieng+1998]. Un concept est une interprétation organisée et structurée d'une partie du monde utilisée pour penser et communiquer sur celle-ci [Darlington+2008]. Une ontologie permet ainsi à une communauté d'exprimer et de partager des informations sémantiques consensuelles [Studer+1998]. Les ontologies sont généralement organisées en classifications d'éléments, sous forme d'arborescence ou de graphe, dont le principe le plus commun est la généralisation/spécialisation [Sowa1984]. Une revue de littérature complète sur le concept d'ontologie peut être trouvée dans le *Handbook of Ontologies* version 2009 [Staab+2009].

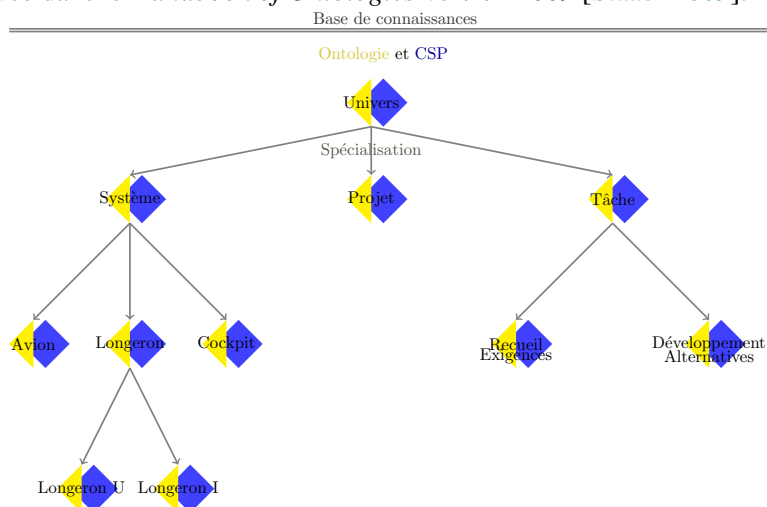


FIGURE 3.4 – Association *CSP* et Ontologie de concepts



Dans le cadre du projet ANR ATLAS (2007-2011), et plus particulièrement dans les travaux de thèse de M. J. Abeille [Abeille2011], nous associons à chaque concept de l'ontologie proposée, un problème de satisfaction de contraintes, comme illustré en figure 3.4. Cette association permet :

- la structuration hiérarchisée des connaissances pour un domaine particulier et le complètement de celles-ci au fil des conceptions, dans le cadre de ce projet, le domaine était la conception d'avion (nomenclature et projet),
- la création du *CSP* correspondant au couple (produit fini et projet de réalisation) à partir de l'instanciation des *CSP* associés aux concepts de l'ontologie et par la construction descendante (décomposition) de sa nomenclature et du projet de réalisation associé, [Fowler+2005],

- le raisonnement local sur le CSP associé à chaque concept et le raisonnement global sur le couple (produit fini et projet de réalisation) par des mécanismes de propagation verticaux (inter-niveaux de la nomenclature de composants et du graphe de tâches).

Ces travaux ont été valorisés dans [Abeille+2010],[Coudert+2011a], [Coudert+2011b], [Coudert+2012], [Romero Bejarano+2014]*.

3.2.3 Contraintes et Connaissances empiriques



La prise en compte de connaissances empiriques formalisées sous forme d'abaques expérimentaux dans un modèle de connaissances à base de contraintes peut être nécessaire en configuration, tel qu'illustré en figure 3.5, [Vareilles2005] et 3.6 [Chenouard2007]. Ces connaissances sont difficilement formalisables par une seule expression mathématique continue. Il est plus aisé de les approximer par des expressions mathématiques définies par morceaux.

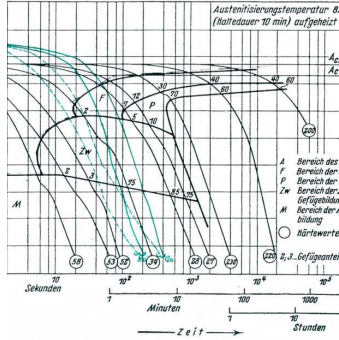


FIGURE 3.5 – Diagramme de Transformation à Refroidissement Continu

Une contrainte définie par morceaux $C(x, y)$ sur l'espace de recherche (D_x^C, D_y^C) est caractérisée par l'union ou collection de n contraintes numériques continues nommées morceaux $c_i(x, y)$ couvrant chacune une région bien déterminée de l'espace de recherche $(D_x^{c_i}, D_y^{c_i})$ telle que $D_x^{c_i} \subseteq D_x^C$ et $D_y^{c_i} \subseteq D_y^C$:

$$C(x, y) \text{ sur } (D_x^C, D_y^C) = \bigcup_{i=1}^n c_i(x, y) \text{ sur } (D_x^{c_i}, D_y^{c_i})$$

Notons qu'une région (D_X, D_Y) peut être couverte par plusieurs contraintes $c_i(x, y)$.

Dans le cadre de mes travaux de thèse [Vareilles2005], nous avons, d'une part, défini la notion contraintes continues numériques binaires définies par morceaux et, d'autre part, posé des hypothèses visant à garantir la connexité des zones cohérentes et incohérentes (contour fermé, monotonie et cohérence des morceaux) et pour pouvoir ainsi les utiliser dans le processus de configuration.



Dans le cadre du projet européen VHT (2002-2005), support de mes travaux de thèse [Vareilles2005], l'estimation des distorsions résultant d'un procédé de trempe nécessite l'identification des points de changement de phase du matériau trempé. Afin de caractériser la dureté après trempe et d'approximer les déformations potentielles, les métallurgistes exploitent deux abaques expérimentaux, liant la température au temps, correspondant au diagramme de phases (diagramme de transformations

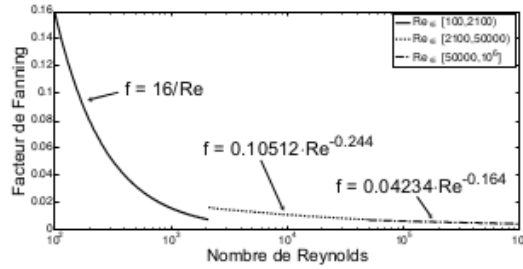
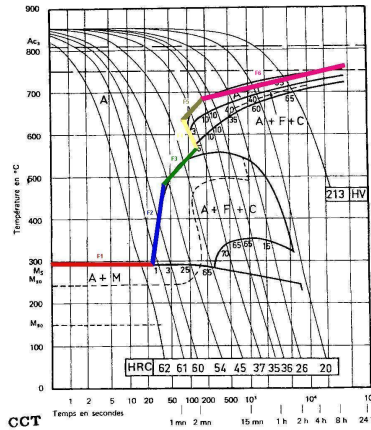


FIGURE 3.6 – Nombre de Reynolds

Composition: 0.52% C - 0.60% Mn - 0.40% Si - 0.011% S - 0.013% P - 0.17% Ni - 1.00% Cr - 0.22% Mo - 0.38% Cu - <0.05% V Grain size: 10-11 Austenitized at 850°C (1562°F) for 30 min



$$TRC(x, y) = \bigcup \left\{ \begin{array}{l} f_1(x, y) \text{ sur } D_x^{f_1} \text{ et } D_y^{f_1} \\ f_2(x, y) \text{ sur } D_x^{f_2} \text{ et } D_y^{f_2} \\ f_3(x, y) \text{ sur } D_x^{f_3} \text{ et } D_y^{f_3} \\ f_4(x, y) \text{ sur } D_x^{f_4} \text{ et } D_y^{f_4} \\ f_5(x, y) \text{ sur } D_x^{f_5} \text{ et } D_y^{f_5} \\ f_6(x, y) \text{ sur } D_x^{f_6} \text{ et } D_y^{f_6} \end{array} \right.$$

FIGURE 3.7 – Représentation d’un abaque expérimental sous forme d’une contrainte continue numérique binaire définie par six morceaux

en refroidissement continu ou *TRC*) spécifique à l’acier trempé et au faisceau de lois de refroidissement, dépendant des paramètres du procédé. La superposition de ces deux abaques permet d’estimer les temps de premier changement de phases à cœur et en surface de la pièce. Plus le laps de temps entre les premiers changements de phases à cœur et en surface est important, plus la pièce aura tendance à se déformer. Pour déterminer les temps de premier changement de phases, nous modélisons les diagrammes *T.R.C.* par des contraintes numériques binaires définies par morceaux, comme l’illustre la figure 3.7 et les lois de refroidissement par des polynômes de degré 4.

Ces travaux ont été valorisés dans [Aldanondo+2008b]*, [Vareilles+2009a]*.

3.2.4 Contraintes et Connaissances contextuelles



Afin de fournir une aide enrichie à l’utilisateur, nous considérons en plus des connaissances générales formalisées par des *CSP*, des connaissances contextuelles.

Dans la littérature, les connaissances contextuelles sont définies comme non-nécessairement explicites et concernent le contexte dans lequel des événements peuvent se produire au sein d’activités humaines [Pantazi+2004], [Brézillon2007], [Montani2011]. Les connaissances contextuelles sont, dans notre cas, des connaissances explicites, mais qui, pour pouvoir être exploitées, nécessitent d’être contextualisées, c’est-à-dire précisées en fonction du contexte de mise en oeuvre. Nous tenons à souligner que la frontière entre connaissances générales et contextuelles

Contrairement aux connaissances générales, les connaissances contextuelles sont pertinentes et exploitables pour un nombre plus réduit de situations spécifiques, mais moins stables dans le temps. Il est, par conséquent, plus délicat de les formaliser comme un *CSP* car elles peuvent couvrir qu’un sous-ensemble du contexte et nécessitent une mise à jour régulière pour rester valide dans un contexte changeant.

Dans nos travaux, nous formalisons les connaissances contextuelles sous forme de base de cas exploitables par des raisonnements à partir de cas ou *CBR* [Kolodner1993b] [Aamodt+1994] [Finnie+2003] et des algorithmes de *Data-Mining* [Fayyad+1996] [Kurgan+2006], [Liao+2012].

Chaque cas \mathcal{C} est décrit par un ensemble de variables valuées \mathcal{V} (aussi appelées selon les références descripteurs ou attributs) dont on a, auparavant, fixé le domaine de définition \mathcal{D}_V [Kolodner1993b]. L'ensemble des variables d'un cas permet de décrire le problème rencontré et la solution proposée. Lorsqu'un cas est stocké en base de données, chacune de ses variables doit être renseignée et valuée à une valeur unique.

Les connaissances contextuelles peuvent être utilisées conjointement à des connaissances générales [Montani2011]. Dans l'ensemble des travaux portés à notre connaissance, les connaissances générales et contextuelles sont utilisées de manière séquentielle, l'une après l'autre, sans réelle interaction, selon le degré de confiance qui leur est accordé [Codet de Boisse2013] :

- les connaissances générales sont validées ou invalidées par tests successifs des cas présents dans une base de cas [Felfernig+2009], [Felfernig+2015].
- les connaissances générales sont enrichies par extraction et généralisation de connaissance contextuelles contenues dans des bases de cas [Brin+1997], [Nortet+2005],
- les connaissances contextuelles sont adaptées ou généralisées à un contexte analogue par ajout de connaissances générales afin d'obtenir une solution adéquate au contexte [Purvis+1995], [Inakoshi+2001], [Ruet+2002], [Roldan+2011], [Qin+2009], [Roldan Reyes+2015],
- les connaissances générales, trop générales ou incomplètes, sont complétées par des connaissances contextuelles afin de particulariser une solution à un contexte particulier [Squalli+1998].

Contrairement aux travaux présents dans la littérature, nous proposons d'exploiter ces deux types de connaissances simultanément en bonne complémentarité tout au long du processus de configuration. Nous définissons une contrainte contextuelle comme étant une contrainte paramétrique dont les valeurs de paramètres sont fixées à partir de connaissances contextuelles pertinentes. Une contrainte contextuelle est donc une contrainte dont les valeurs peuvent changer en fonction du contexte dans lequel elle est déclenchée.

Une contrainte contextuelle cc est formalisée à l'aide de l'expression suivante [Vareilles+2012a] :

$$cc(LV_R, sim_g^{cc}, ms, LV_C, LV_P, FP)$$

où

- LV_R correspond à la liste des variables décrivant le contexte de recherche (dans la base de cas),
- sim_g^{cc} correspond à la fonction de similarité permettant de classer les cas des plus similaires ou moins similaires dans le contexte décrit par LV_R ,
- ms correspond au seuil minimal de similarité des cas considérés comme similaires dans le contexte donné LV_R ,
- LV_C correspond à la liste des variables des cas à exploiter pour identifier les paramètres,
- LV_P correspond à la liste des paramètres de la contrainte (variables du CSP impactées),
- FP correspond à la fonction de calcul des valeurs de LV_P en fonction des variables de LV_C qui seront injectées dans le CSP, $FP : LV_C \mapsto LV_P$.

Hélimaintenance



Dans le cadre du projet FUI HÉLIMAINTEANCE (2008-2011), support des travaux de thèse de M. A. Codet de Boisse [Codet de Boisse2013], le temps d'immobilisation au sol des appareils est le critère clé à estimer. Afin de conserver son certificat de navigabilité, un hélicoptère doit suivre à la lettre son plan de maintenance ou

M.R.B. (Maintenance Report Board). Le *M.R.B.* est donné par le constructeur pour une certaine gamme d'hélicoptères et spécifie la durée entre deux interventions, le type d'intervention et la description exacte de chaque opération. De plus, chaque opération est accompagnée d'une indication du temps théoriquement nécessaire à sa réalisation. Ceci permet d'estimer le temps total théorique de maintenance de l'appareil, et donc le temps théorique d'immobilisation au sol. Les connaissances générales et législatives contenues dans le plan de maintenance ou *M.R.B.* sont formalisées comme un *CSP*. Afin de préciser au mieux la durée d'immobilisation d'un appareil, nous prenons en compte des connaissances contextuelles relatives principalement aux conditions d'utilisation, d'exploitation et de maintenance des aéronefs, stockées dans des cas représentant des maintenances passées.

Ces travaux ont été valorisés dans [Codet de Boisse+2010], [Vareilles+2012a]*.

3.3 Synthèse du chapitre



Cette première thématique de recherche porte sur la formalisation de connaissances à base de contraintes et l'élaboration de modèles génériques, socle des outils de configuration et d'aide à la décision.

Deux types de connaissances sont formalisées et exploitées dans nos travaux : les connaissances générales, formalisées sous forme de *CSP* et les connaissances contextuelles, formalisées par des cas, regroupés dans des bases. L'utilisation de connaissances générales pour leur validité et cohérence dans un nombre de situations variées est privilégiée.

La diversité des connaissances rencontrées au fil des projets de recherche, nous conduit à assembler et utiliser différents types de contraintes (discrètes, continues, temporelles, conditionnelles, ...), mais aussi à en proposer de nouveaux types :

- les contraintes numériques définies par morceaux, permettant de représenter des connaissances empiriques et de les exploiter en configuration,
- les contraintes contextuelles, permettant de tirer parti, au fil de la configuration, de connaissances contextuelles (valides et plus précises dans un contexte donné) afin de compléter et enrichir l'aide apportée à l'utilisateur.

Dans le cadre de nos travaux, nous structurons les connaissances générales à l'aide d'ontologies de concepts afin de faciliter leur exploitation dans des applications moins routinières. Cette structuration des connaissances nous permet d'instancier un *CSP* correspondant au système complet à concevoir, à partir d'un ensemble de *CSP* associé aux différents composants du système, ajoutés au fil de sa conception.

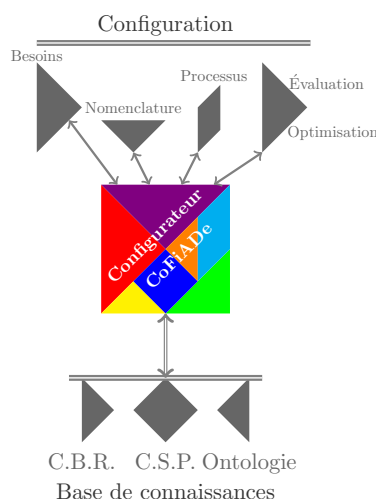
Ces travaux ont donné lieu à la publication de 5 articles WoS* (AIEDAM 2014, EAAI 2012, IJPR 2013, EAAI2009, IJCIM 2008) et 16 communications avec actes édités.

Nos travaux associant configuration et contraintes nous ont conduit à participer aux comités scientifiques de *Configuration Workshop* en 2010, 2012, 2014 et 2015. Il est envisagé d'organiser l'édition 2016 à Toulouse (adossé à la conférence CP2016) en collaboration avec le Professeur L. Hvam du *Danmarks Tekniske Universitet*, Denmark.

Le travail mené en collaboration avec le Professeur L. Zhang de l'*University of Groningen*, Pays Bas, en 2012 lors de son séjour de 3 mois dans notre laboratoire, a conforté nos propositions quant à l'association de la configuration et des contraintes. Un échange académique au *Danmarks Tekniske Universitet*, Denmark (2 mois en 2015) nous a permis de consolider nos travaux avec

des problématiques connexes telles que la conception modulaire de produits et la formalisation des connaissances nécessaires aux modèles génériques.

Exploitation des connaissances et Filtrage



L'exploitation des connaissances formalisées est la clé de voûte des outils de configuration et plus généralement des outils d'aide à la décision à base de connaissances. C'est le raisonnement conduit sur celles-ci qui permet de guider l'utilisateur, sans détour, vers une bonne ou la meilleure solution. Dans nos travaux de recherche, la diversité des connaissances formalisées sous forme de *CSP* et l'interaction avec l'utilisateur nous conduisent à assembler et adapter des algorithmes de filtrage de faible degré (garant de l'interactivité) dans un moteur générique de propagation de contraintes, intégré à notre solution logicielle. CoFiADe permet de formaliser des connaissances sous la forme d'un *CSP* via un langage de modélisation spécifique, et de piloter une interface Web, offrant ainsi la possibilité aux utilisateurs, via une vision arborescente

du modèle, de réduire progressivement le domaines des variables pour converger vers une solution. Afin d'apporter une aide originale et enrichie aux utilisateurs, nous couplons ces méthodes de filtrage des contraintes avec d'autres techniques d'aide à la décision.

Premièrement, afin de proposer à l'utilisateur des recommandations quant aux choix de valeurs possibles, nous paramétrons les contraintes contextuelles à partir d'un ensemble de cas pertinents identifiés par des techniques de *CBR* dont la fréquence d'occurrence (recommandation) est calculée à l'aide d'algorithmes issus du *Data-mining*. Deuxièmement, nous couplons les *CSP* avec des algorithmes évolutionnaires afin de présenter à l'utilisateur un ensemble de solutions Pareto-optimales parmi lesquelles il peut faire le *meilleur* choix au regard des critères optimaux.

Ce chapitre présente, dans un premier temps, les différentes méthodes de traitement des *CSP* : filtrage, résolution et approche par diversité compilée. Puis, dans un second temps, nos apports et contributions scientifiques, relatifs à l'exploitation des connaissances en configuration interactive, sont positionnés dans leur contexte industriel (projet de recherche), international (collaboration avec des chercheurs étrangers) et scientifique (thèses de doctorat, publications *WoS** et communications avec actes édités).

4.1 Méthodes de traitement des CSP

Nous présentons dans cette section les méthodes de traitement des problème de satisfaction de contraintes qui permettent de raisonner sur la connaissance capitalisée et aider ainsi à la décision. Dans un premier temps, nous présentons les méthodes de filtrage qui réduisent progressivement l'espace de solutions au fil des choix utilisateurs. Puis, dans un deuxième temps, les méthodes de résolution sont évoquées. Elles permettent de trouver une, plusieurs ou toutes les solutions d'un problème, après avoir éventuellement saisie des choix utilisateur. Enfin, nous présentons l'approche par diversité compilée. Celles-ci permettent de représenter de manière exhaustive l'espace des solutions et de naviguer dans celui-ci sans possibilité d'atteindre une non-solution (incohérence du CSP).

4.1.1 Méthodes de filtrage des CSP

Les méthodes de filtrage utilisent les contraintes pour effectuer des déductions sur le problème en détectant les affectations partielles localement ou totalement incohérentes¹. L'une des techniques les plus utilisées est la technique de renforcement de la cohérence locale ou cohérence d'arc [Montanari1974]. La cohérence d'arc vérifie que toute valeur du domaine d'une variable est compatible avec chaque contrainte prise séparément. Il existe des méthodes de filtrage basées sur la cohérence d'arc spécifiques aux différents types de CSP :

- les techniques de k-cohérence (arc-cohérence et chemin-cohérence) principalement utilisées dans la cas des CSP discrets ou mixtes [Mackworth1977 ; Bessière+1993 ; Bessière+1994 ; Faltings1994],
- les techniques de 2B-cohérence [Lhomme1993] ou Box-cohérence [Benhamou+1994 ; Benhamou1996] pour les CSP continus et temporels quantitatifs [Rossi+2006].

Il existe plusieurs degrés de filtrage qui permettent de vérifier la cohérence de n -uplets de valeurs de variables. Le degré de filtrage correspond au nombre de variables participant à la vérification de la cohérence locale. Plus le degré est grand (k-cohérence au sens fort) [Freuder1982], meilleure est la détection des combinaisons incohérentes, mais plus il faut de temps pour les détecter [Vareilles2005].

Les méthodes de filtrage permettent de répercuter des choix sur le problème courant en éliminant les valeurs devenues incohérentes. La recherche de solutions est alors interactive : c'est la séquence de choix cohérents qui conduit à une ou plusieurs solutions.

4.1.2 Méthodes de résolution et CSP

Il existe deux familles de méthodes de résolution : les méthodes complètes et les méthodes incomplètes.

Les méthodes complètes de résolution de CSP explorent de manière systématique l'espace de recherche et sont capables de fournir toutes les solutions d'un problème. L'algorithme de recherche de base le plus souvent utilisé est l'algorithme de retour arrière ou *backtrack* [Golomb+1965]. Cet algorithme met en place une stratégie de *profondeur d'abord*, avec un mécanisme de retour arrière sur la situation précédente lorsqu'il détecte que l'affectation partielle courante n'est pas cohérente. Cet algorithme est souvent amélioré par des heuristiques déterminant, par exemple,

1. Une affectation est partielle lorsque seul un sous-ensemble des variables est instancié.

l'ordre des variables à instancier et l'ordre des valeurs à tester pour minimiser le nombre de branches à explorer.

Les méthodes de résolution dites incomplètes n'explorent pas de façon systématique l'espace de recherche. Elles sont basées sur une exploration opportuniste de l'ensemble des affectations complètes² et ne fournissent qu'un sous-ensemble de solutions. Elles nécessitent une fonction d'évaluation et de comparaison d'affectations. Nous pouvons citer la méthode de recherche tabou [Glover+1993] ou le recuit simulé [Kirkpatrick+1983]. Ces méthodes incomplètes sont généralement utilisées pour résoudre des problèmes de taille élevée.

Les algorithmes de résolution sont souvent couplés à des méthodes de filtrage afin d'améliorer la résolution en supprimant les valeurs incohérentes des domaines des variables. Par exemple, le *Forward checking* [Haralick+1980] combine le filtrage par arc-cohérence avec un algorithme de retour arrière. Une comparaison des différents couplages peut être trouvée dans [Lobjois+1997].

Ces méthodes de résolution complète ou incomplètes permettent de résoudre indifféremment des CSP discrets, continus après discrétisation des domaines de variables et mixtes. Une revue des différentes méthodes de résolution actuelle peut être trouvée dans le *Handbook of Constraint Programming* [Rossi+2006].

4.1.3 Diversité compilée et CSP

Certaines approches par contraintes sont basées sur la transformation d'un CSP par compilation en un automate à états finis pour générer toutes les successions d'instanciations possibles et représenter ainsi de manière exhaustive l'espace des solutions [Vempaty1992]. Ce type de méthode a l'avantage d'éviter les retours arrière une fois l'automate compilé et résout le problème de qualité de filtrage [Amilhastre+2014]. Les automates à états ont été étendus aux domaines continus et ainsi au CSP continu et mixtes par [Niveau+2010]. L'utilisation des automates à états garantit que les choix utilisateurs conduisent bien à une solution (contrairement aux méthodes de filtrage de faible degré qui peuvent conserver des valeurs amenant à des non-solutions), en un temps constant.

Cette approche présente, cependant, deux inconvénients majeurs [Bessiere+2013] :

- le temps de compilation et la taille de l'automate compilé peuvent constituer un problème suivant la taille du modèle de connaissances [Narodytska+2007] ;
- il n'existe pas de mécanismes de gestion de la pertinence (de variables, de sous-ensembles, de contraintes) : un automate compilé a une structure statique.

4.2 Apports et Contributions Scientifiques

Dans le cadre de nos travaux de recherche, nous sommes confrontés à une large diversité de connaissances à exploiter pour supporter l'activité de configuration interactive. Cette diversité nous conduit à assembler dans un moteur de propagation générique, intégré à notre solution logicielle CoFiADe, plusieurs méthodes de filtrage et à les adapter si besoin, afin de propager au mieux les choix utilisateur sur le modèle générique.

Ce chapitre présente l'ensemble de ces contributions en les positionnant dans leur contexte industriel, scientifique (thèses de doctorat, articles WoS* et communications avec actes édités) et international.

2. Une affectation est complète lorsque l'ensemble de toutes les variables est instancié.

4.2.1 CoFiADe : *Constraint Filtering for Aiding Design*



CoFiADe est une solution logicielle dédiée à l'aide à la décision interactive en conception et configuration. Il permet aux experts de formaliser, via un langage spécifique, les connaissances du problème sous forme d'un *CSP* contenant des variables de différents types (discrètes et numériques), et des contraintes de différentes natures (compatibilité et activation) et de différents types (tables de compatibilité et expressions mathématiques). Le moteur de filtrage générique de CoFiADe nous permet de tester et valider l'ensemble de nos propositions.

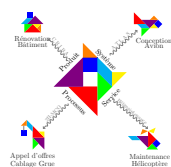
Les spécificités de CoFiADe sont les suivantes :

- pouvoir associer aux variables des domaines continus multi-intervalles [Vareilles2005],
- définir et traiter dans un même problème, des contraintes de compatibilité discrètes, continues et mixtes,
- définir des expressions mathématiques telles que les fonctions numériques et les contraintes par morceaux,
- autoriser explicitement l'ajout d'ensembles de variables, de contraintes et de sous-problèmes selon le modèle des *RequireVariable* proposé par Mittal [Mittal+1990]

Contrairement à ILOG CP 5.5, Choco-Solver et ECLiPSe, CoFiADe n'intègre que des méthodes de filtrage : il ne fait pas de résolution de problème, mais il peut facilement s'interfacer avec des moteurs de résolution spécifiques pour résoudre un sous-problème particulier [Vareilles+2009b], [Vareilles+2012c]. CoFiADe intègre plusieurs méthodes de filtrage de faible degré :

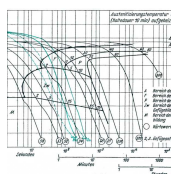
- un algorithme de filtrage par arc-cohérence pour les tables de compatibilité discrètes [Mackworth1977], continues [Vareilles2005] et mixtes [Faltings1994],
- un algorithme de filtrage par $2B$ -cohérence [Lhomme1993], basé sur l'arithmétique des intervalles [Moore1966] pour les fonctions numériques, algorithme qui est étendu aux domaines continus multi-intervalles [Vareilles2005],
- un algorithme de filtrage par arbre quaternaire [SamHaroud+1996] étendu aux contraintes continues numériques binaires définies par morceaux [Vareilles+2009a]*.

CoFiADe possède une interface Web, cofiade.mines-albi.fr, permettant aux utilisateurs, via une vision arborescente du modèle, de réduire progressivement le domaine des variables pour converger vers une solution. Cette réduction s'effectue soit par le choix d'une valeur unique dans le domaine des variables, soit par le choix d'un ensemble de valeurs désirées (équi-préférabilité positive entre valeurs), ou bien, par l'exclusion explicite d'un ensemble de valeurs (équi-préférabilité négative entre valeurs).



CoFiADe, écrit en Perl, est développé et maintenu à l'école des mines d'Albi-Carmaux. Il est issu des travaux de thèses et de recherches menés au sein de notre laboratoire [Vareilles2005], [Van Oudenhove de Saint G ry2006], [Djefel2010], [Abeille2011] et [Codet de Boisse2013]. Il sert de support à l'ensemble de nos applications industrielles et intègre l'ensemble de nos propositions.

4.2.2 Méthodes de filtrage et contraintes par morceaux



Les contraintes numériques définies par morceaux $C(x, y)$, représentant principalement des connaissances empiriques, sont discr t s es sous forme d'arbres quaternaires ou *quad tree* (structure arborescente de rectangles) afin d'être exploitées et filtrées dans le processus de configuration.

Les arbres quaternaires [Finkel+1974], [Samet1984] permettent de représenter et d'intégrer dans les CSP des contraintes continues numériques binaires discrétisées qui ne possèdent pas forcément les propriétés de monotonie et de projetabilité indispensables pour un filtrage par 2B-cohérence [Lhomme1993], [Lottaz2000].

Leur génération à partir de la définition symbolique des contraintes binaires $C(x, y)$ est réalisée en exploitant l'arithmétique des intervalles [Moore1966]. L'espace de recherche est découpé récursivement en rectangles (d_n^x, d_n^y) , associés aux nœuds de l'arbre, jusqu'à l'atteinte d'une précision prédéfinie ε_x et ε_y [SamHaroud1995]. La cohérence de chaque nœud est vérifiée au fur et à mesure du découpage et chacun se voit affecter :

- la couleur terminale **bleue** s'il est totalement incohérent avec $C(x, y)$,
- la couleur terminale **blanche** s'il est totalement cohérent avec $C(x, y)$,
- la couleur grise s'il est partiellement cohérent avec $C(x, y)$ et s'il n'est pas unitaire, le nœud doit être à nouveau décomposé.

L'attribution d'une étiquette unique à chacun des nœuds à partir de ses coordonnées (courbe remplissante de Peano en N et de l'ordre de Morton, [Briggs+1991]) facilite la recherche de ses ascendants et de ses descendants et par conséquent le parcours de cette structure arborescente.

Nous étendons les propositions de SAM-HAROUD aux contraintes continues numériques binaires définies par morceaux $C(x, y)$ sur $(D_x^C, D_y^C) = \bigcup_{i=1}^n c_i(x, y)$ sur $(D_x^{c_i}, D_y^{c_i})$ par l'ajout de différents degrés d'information pertinente des nœuds, matérialisés par des couleurs spécifiques :

- **rouge** pour les nœuds *vides* d'information : $((d_n^x, d_n^y) \cap (D_x^{c_i}, D_y^{c_i}) = \emptyset)$,
- **vert** pour les nœuds *sous-informés* : $((d_n^x, d_n^y) \cap (D_x^{c_i}, D_y^{c_i}) \neq \emptyset) \wedge ((d_n^x, d_n^y) \cap c_i(x, y) = \emptyset)$,
- **jaune** pour les nœuds *frontières unitaires* : $\exists j, ((d_n^x, d_n^y) \cap c_j(x, y) \neq \emptyset)$ et
- **orange** pour les nœuds *sur-frontières unitaires* : $\exists (j, o), ((d_n^x, d_n^y) \cap c_j(x, y) \neq \emptyset) \wedge ((d_n^x, d_n^y) \cap c_o(x, y) \neq \emptyset)$.

En effet, comme seules les zones $(D_x^{c_i}, D_y^{c_i})$ couvertes par les contraintes $c_i(x, y)$ possèdent de l'information et délimitent les zones cohérentes et incohérentes, il faut identifier le degré d'information pertinente de chaque nœud, puis propager par voisinage les zones cohérentes et incohérentes. Les feuilles voisines d'un nœud sont identifiées à partir de leur étiquette.

Différentes campagnes d'informations sont lancées pour propager les zones cohérentes et incohérentes. Les feuilles *frontières unitaires* **jaunes** commencent par informer leurs feuilles voisines **vertes** et **rouges** de leur cohérence en fonction du côté de la frontière auquel elles appartiennent. Puis, les feuilles **bleues** et **blanches** indiquent à leurs feuilles voisines **vertes** et **rouges** qu'elles sont respectivement incohérentes et cohérentes avec la contrainte définie par morceaux. Enfin, les feuilles unitaires **jaunes** et **oranges** deviennent cohérentes avec la contrainte et se colorent en **blanc**, si seul ce qui est totalement incohérent avec la contrainte est à exclure. Les zones cohérentes et incohérentes avec la contrainte continue numérique binaire définie par morceaux sont ainsi délimitées.

Les arbres quaternaires associés à la contrainte d'inégalité définie par morceaux *Borne* définissant l'intérieur d'une borne comme espace cohérent, avec $\varepsilon_x = \varepsilon_y = 0.25$ sont présentés par la figure 4.1 avant propagation des couleurs des nœuds (à gauche) et après les campagnes d'information (à droite).

Dans un contexte d'aide à la décision interactif, nous privilégions les filtrages de faible degré. Nous utilisons donc la méthode de filtrage développée par SAM-HAROUD, nommée τ -AC-3,

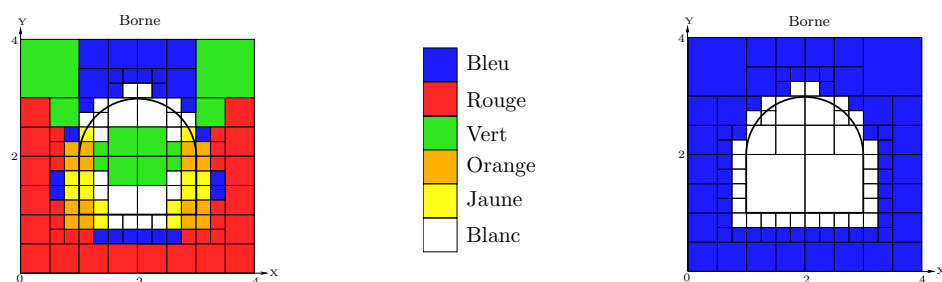


FIGURE 4.1 – Degrés d’information pertinente avant et après les campagnes d’information.

qui filtre par arc-cohérence des contraintes n -aires représentées par des 2^k -arbres. Le retrait des valeurs ne menant à aucune solution est effectué en réalisant l’union des feuilles cohérentes **blanches** de l’arbre quaternaire intersectée avec les domaines courants des variables de la contrainte³. La prise en compte de plusieurs contraintes continues numériques binaires portant sur la même paire de variables et sur le même espace de définition est réalisée par le mécanisme de *fusion*. L’arbre résultat contenant la conjonction de toutes les contraintes binaires est construit à partir de la comparaison des couleurs de chacun des nœuds des arbres quaternaires associés aux contraintes suivant l’ordre établi : **blanc** < gris < **bleu** [SamHaroud1995].

La représentation de contraintes sous forme d’arbres quaternaires possède un certain nombre de limites dues :

- aux degrés de précision qui approchent les résultats de filtrage ε_x et ε_y ,
- à l’utilisation de l’arithmétique des intervalles qui peut engendrer des explorations inutiles de l’espace des solutions lors de la construction de l’arbre.



Dans le projet européen VHT (2002-2005), support de mes travaux de thèse [Vareilles2005], nous modélisons les diagrammes *T.R.C.* par des contraintes numériques binaires définies par morceaux. Les méthodes de filtrage τ -AC-3 et de *fusion* d’arbres quaternaires sont implémentées dans CoFiADe.

Ces travaux ont été valorisés dans [Vareilles+2003], [Vareilles+2004], [Aldanondo+2005a], [Aldanondo+2008b]*, [Aldanondo+2006d], [Vareilles+2009a]*.

4.2.3 Méthodes de filtrage et contraintes contextuelles



Les contraintes contextuelles permettent d’injecter, à bon escient, des connaissances contextuelles au fil de la configuration afin de préciser certains éléments du problème au regard du contexte de configuration. Leur filtrage repose sur l’exploitation de cas pertinents, identifiés par un *CBR*, puis leur enrichissement par ajout de leur fréquence d’occurrence, mesurée par des techniques de *Data-Mining*.

Les raisonnements à partir de cas exploitent des connaissances contextuelles regroupées dans des instances du problème appelées « cas » [Kolodner1993b] [Aamodt+1994] [Finnie+2003]. Chaque cas \mathcal{C} est décrit par un ensemble de variables valuées \mathcal{V} (aussi appelées selon les références descripteurs ou attributs) dont on a, auparavant, fixé le domaine de définition \mathcal{D}_V . Une mesure de distance permet de classer les différents cas de la base \mathcal{C}_j (cas source) par rapport à leur similitude avec le problème soumis \mathcal{C}_j (cas cible) [Kolodner1993a]. Deux mesures de similarité sont ainsi exploitées :

3. Ce qui revient à retirer des domaines des variables l’union des nœuds **bleus**, comme dans l’algorithme originel de [SamHaroud1995].

- une mesure de similarité locale sim_v liée aux valeurs v des variables \mathcal{V} [Bergmann2002]. Cette similarité définit la similitude entre les valeurs des domaines \mathcal{D}_V des variables, prises deux à deux. Cette mesure de similarité est soit booléenne (différent 0 et semblable 1), soit une formule mathématique sur $[x, \bar{x}]$ d'image $[0, 1]$ (fonctions linéaires, exponentielles ...), soit une matrice carrée dont les coefficients $\in [0, 1]$.
- une mesure de similarité globale sim_g liée aux cas \mathcal{C} . Cette similarité agrège les similarités locales sim_v , afin de déterminer la similarité globale entre deux cas \mathcal{C}_i et \mathcal{C}_j . Elle est exprimée sous forme d'une formule mathématique indiquant comment considérer les similarités locales : fonction produit, minimum, moyenne ou encore Minkowski [Avramenko+2006], [Nunez+2004].

La définition des mesures de similarité locales et globales est critique car c'est sur ces mesures que se base l'ensemble des raisonnements. À la fin de l'étape de recherche, l'ensemble des k cas mesurés les plus proches $\mathcal{C} \mathcal{P}$ est retourné. Commencent alors les autres étapes du cycle d'utilisation d'un CBR : sélection d'un ou plusieurs cas de $\mathcal{C} \mathcal{P}$, analyse et adaptation de sa (leurs) solution(s) pour répondre au problème courant. La base est ensuite enrichie par le problème courant adapté et révisé, décrit au travers de ses variables \mathcal{V} .

Le *Data-mining* ou fouille de données [Fayyad+1996] [Kurgan+2006], [Liao+2012] est l'ensemble des méthodes et techniques destinées à l'exploration et l'analyse de grandes bases de données, en vue de détecter dans ces données, des règles d'associations, des tendances inconnues et des structures particulières restituant l'essentiel de l'information en réduisant la quantité de données étayant la prise de décision. Il existe deux grandes classes d'algorithmes de *Data-mining* [Han2005] : les méthodes descriptives (ou exploratoires) visant à mettre en évidence des informations présentes mais cachées par le volume de données et les méthodes prédictives (ou explicatives) visant à extrapoler de nouvelles informations à partir de connaissances stockées dans des bases de données.

Les difficultés de mise en place d'une fouille de données sont : l'agglomération de l'information qui peut nécessiter de créer des bases de données de taille très importante, le choix et le paramétrage de l'algorithme de fouille qui est un point particulièrement délicat et demande une connaissance experte des algorithmes utilisés, et enfin l'interprétation des données, clé de la qualité des données restituées [Codet de Boisse2013].

Dans le cadre de nos travaux, nous exploitons une méthode prédictive d'association et utilisons l'algorithme *APRIORI* [Agrawal+1993]. Cet algorithme détermine à partir d'une base de cas, des relations d'implications : Antécédent \Rightarrow Conséquent (Support ; Confiance) où

- Antécédent est un n -uplet de données décrivant une condition de déclenchement de la règle,
- Conséquent est un n -uplet de données qui est le résultat de la condition de déclenchement,
- *Support* est le pourcentage d'apparition du couple Antécédent \Rightarrow Conséquent dans la base de données, c.-à-d. $Support = P(\text{Antécédent} \cup \text{Conséquent})$,
- *Confiance* est le pourcentage d'apparition du conséquent lorsque l'antécédent est présent, c'est-à-dire $Confiance = \frac{P(\text{Antécédent} \cup \text{Conséquent})}{P(\text{Antécédent})}$.

Afin de paramétrer les contraintes contextuelles $cc(LV_R, sim_g^{cc}, ms, LV_C, LV_P, FP)$, présentées en sous-section 3.2.4, nous utilisons de manière séquentielle la recherche de cas pertinents dans une base par l'utilisation de la phase de recherche du cycle CBR, puis leur enrichissement par le calcul de leur fréquence d'occurrence par *Data-mining* :

Recherche des cas pertinents : le principe est assez similaire à l'étape de recherche du CBR mais le cas cible est décrit uniquement par les variables LV_R associées à leur domaine

courant (pas forcément une valeur singleton). Le cas cible \mathcal{C}_j est confronté à chaque cas source \mathcal{C}_j sur LV_R afin d'évaluer sa similarité globale sim_g^{cc} telle que définie dans la contrainte cc . Chaque cas source \mathcal{C}_j dont la similarité globale sim_g^{cc} est supérieure au seuil fixé (soit par l'utilisateur, soit par un expert) m_s est sélectionné afin d'être enrichi par *Data-mining*. Le calcul des paramètres LV_P par FP est réalisé avant enrichissement.

Enrichissement des cas pertinents : l'algorithme *APRIORI* est appliqué à cette base de cas pertinents avec comme règle $LV_R \Rightarrow LV_C$. Le calcul du *Support* n'apporte aucune information car il s'apparente à une couverture complète de la base dans le contexte courant ($Support = 1$). Seule la *Confiance* des valeurs des paramètres LV_P est calculée, celle-ci correspondant à la fréquence d'occurrence des valeurs des paramètres LV_P dans un contexte donné LV_R . Cette information est transmise à l'utilisateur comme recommandation sur le choix des valeurs restantes, comme illustré en figure 4.2.

Les contraintes contextuelles sont filtrées si l'un des deux événements suivants apparaît :

- le contexte de recherche LV_R est modifié soit directement par l'utilisateur, soit par propagation de contraintes. Cette modification précise le contexte de recherche et réduit potentiellement le nombre de cas pertinents. Cette réduction du nombre de cas peut avoir un impact sur l'évaluation des contraintes contextuelles et donc sur les domaines des variables LV_P du *CSP*.
- l'espace des solutions du *CSP* est modifié. Si l'une des variables est réduite, cette modification doit être propagée sur l'ensemble des variables reliées à elle par une contrainte. Si cette réduction opère sur l'une des variables LV_P , il faut à nouveau évaluer la contrainte contextuelle sur FP en modifiant éventuellement les domaines des variables LV_C .



Dans le cadre du projet FUI HÉLIMAINTENANCE (2008-2011), et plus particulièrement dans les travaux de thèse de M. A. Codet de Boisse [Codet de Boisse2013], nous définissons une contrainte contextuelle pour estimer, le plus précisément possible, le temps d'immobilisation au sol des hélicoptères en maintenance. La contrainte contextuelle associée est décrite par LV_R l'ensemble des variables descriptives des conditions de vol (ambiance, pays ...), sim_g^{cc} la moyenne des similarités locales de LV_R , m_s de 0.85 (donné par un expert), LV_C le temps théoriques d_{th} (fournis par le *M.R.B.*) et réels d_{rm} de maintenance constatés, LV_P le coefficient α de modulation du temps estimé de maintenance $des = \alpha * d_{th}$ et FP la fonction calculant le ratio entre le réel d_{rm} et le théorique d_{th} pour déterminer α , $FP : \alpha = \frac{d_{rm}}{d_{th}}$.

Ces travaux ont été valorisés dans [Codet de Boisse+2010], [Vareilles+2012a]*, [Coudert+2012]. Dans le cadre de ces travaux, un séjour de 2 semaines en 2011 au département de *Mathématiques et de Génie Industriel* de l'école Polytechnique de Montréal m'a permis de monter en compétence sur le *Data-mining* et l'exploitation des connaissances contextuelles en aide à la décision.

4.2.4 Méthodes de filtrage et algorithmes évolutionnaires

Après avoir recueilli l'ensemble des besoins non-négociables de l'utilisateur, l'espace des solutions peut être encore conséquent [Amilhastre+2002b]. La présentation d'un large éventail de solutions optimales multi-critère, tenant compte des besoins négociables de l'utilisateur, peut alors permettre à l'utilisateur de prendre la meilleure décision.

Nous intégrons les *CSP* dans un algorithme évolutionnaire *EA* SPEA2 pour *Strength Pareto Evolutionary Algorithm*, [Zitzler+1989], [Zitzler+2001], [Pitiot2009] afin de générer cet ensemble de solutions Pareto-optimales.

Le fonctionnement général d'un algorithme évolutionnaire *EA* se compose de quatre étapes clés :

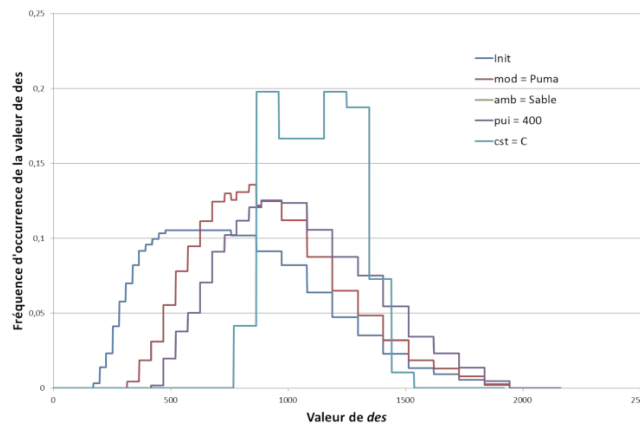


FIGURE 4.2 – Contraintes contextuelles et recommandations

- A) Génération d'une population initiale de façon aléatoire.
- B) Évaluation d'une performance des individus par calcul de la fonction de *fitness*⁴.
- C) Sélection d'un certain nombre d'individus selon leur *fitness* afin de générer une population intermédiaire ou *mating pool*.
- D) Engendrement de la nouvelle génération à partir de la *mating pool* à l'aide de deux opérateurs :

L'opérateur de croisement est essentiellement utilisé pour l'aspect recherche de meilleures solutions. Il enrichit la diversité de la population en manipulant la structure des chromosomes [Michalewicz1996], [Beyer2001]. L'opérateur de croisement fait intervenir deux parents pris au hasard dans la *mating pool* pour aboutir à deux enfants. Il consiste à échanger les gènes des parents, selon une probabilité de croisement pc , afin de donner des enfants qui portent à la fois les propriétés des deux parents. Bien qu'il soit aléatoire, cet échange d'information permet de remplacer les mauvais gènes d'un parent avec les bons gènes de l'autre.

L'opérateur de mutation est nécessaire pour conserver une diversité dans la population et couvrir au maximum l'espace des solutions. Il apporte aux algorithmes évolutionnaires la propriété d'ergodicité de parcours de l'espace de recherche (atteinte de tous les points de l'espace de recherche). La convergence des *EA* dépend donc fortement de cet opérateur. L'opérateur de mutation consiste à tirer aléatoirement, selon une probabilité de mutation pm , un gène dans le chromosome d'un individu pris dans la *mating pool* et à remplacer la valeur de ce dernier par une valeur tirée aléatoirement dans l'ensemble des valeurs potentielles du gène.

Les opérations précédentes sont réitérées à partir de B jusqu'à ce qu'un critère d'arrêt soit satisfait (nombre de générations atteint, par exemple).

De nombreux travaux essayent d'intégrer les *CSP* et les *EA*. COELLO COELLO maintient un large état de l'art de ces méthodes⁵. Quatre types de méthodes prenant en compte les contraintes existent :

- Les fonctions de pénalité [Richardson+2009] qui transforment un problème d'optimisation contraint en un problème non contraint et incluent dans la fonction d'évaluation des solutions *fitness* un terme basé sur le nombre de contraintes violées par la solution évaluée.

4. Une valeur de *fitness* nulle indique que la solution appartient au front de Pareto.

5. <http://www.cs.cinvestav.mx/~constraint/>

- Les méthodes de recherche des solutions faisables par réparation [SalcedoSanz2009] dans lesquelles deux populations co-évoluent [Michalewicz+1995] : une qui contient des individus incohérents qui sont réparés par des opérateurs spécifiques, et l'autre constituée d'individus faisables et évalués par la fonction objectif, et par échantillonnage de l'espace faisable [Schoenauer+1993] et l'exploitation des contraintes du problème une par une dans un ordre particulier.
- Les méthodes hybrides qui séparent la fonction objectif des contraintes du problème. La première approche traite les contraintes avec des procédures d'optimisation déterministes (en utilisant le Simplexe, par exemple), alors que la fonction objectif est toujours optimisée par AE [Myung+1995], [Waagen+1992]. Alors que dans la seconde approche, l'AE réalise ces deux optimisations en utilisant les techniques multi-objectif [Parmee+1994],[Surry+1995].
- Les méthodes de préservation de la faisabilité qui utilisent des opérateurs de génération d'individus cohérents [Kowalczyk1997], [Michalewicz+1995] ou des opérateurs de reproduction spécifiques qui génèrent à partir d'individus faisables d'autres individus faisables eux aussi [Michalewicz+1991], [M+1998]. [Koziel+1999].

Nos travaux s'inscrivent dans cette dernière catégorie de méthodes. Durant la génération des individus, le filtrage des contraintes est employé pour guider l'élaboration, la mutation et le croisement des individus.

Élaboration des individus Cet opérateur permet d'initialiser aléatoirement la population de départ (étape A). Afin d'éviter la génération d'individus incohérents, l'individu en cours de construction est filtré, à chaque instanciation de gène, à l'aide d'un CSP et les gènes non instanciés voient leur domaine de définition réduit. Si il s'avère que l'individu est incohérent, les choix déjà réalisés sont remis en cause par un mécanisme de *backtrack*, avec compteur d'arrêt, permettant la désinstanciation d'une variable sélectionnée aléatoirement.

Mutation des individus Cet opérateur permet de modifier aléatoirement les gènes d'individus sélectionnés aléatoirement dans la *mating pool* selon une probabilité de mutation (étape D). Pour chaque individu, une première étape consiste en la désinstanciation d'un gène, choisi aléatoirement, et à la mise à jour, par filtrage, des domaines des autres gènes. La deuxième étape consiste en le choix d'une valeur aléatoirement sélectionnée dans le domaine filtré et assignée au gène devant muter, et la propagation de cette instanciation sur les autres gènes. Un mécanisme de *backtrack* avec compteur d'arrêt est déclenché si les contraintes ne sont pas vérifiées. Lorsque tous les gènes sont instanciés, la mutation est terminée.

Croisement d'individus Il s'agit de créer deux nouveaux individus à partir d'un couple d'individus existants et cohérents (parents) tout en utilisant le filtrage durant le croisement afin de vérifier la cohérence des individus fils créés (étape D). Cet opérateur permet de mélanger aléatoirement et uniformément les valeurs des gènes issus de deux individus sélectionnés selon une probabilité de croisement. Durant l'opération de croisement, à chaque instanciation d'un gène, le filtrage met à jour les domaines des autres gènes. Si un individu ne respecte pas les contraintes, un mécanisme de *backtrak* avec compteur d'arrêt est réalisé. Lorsque la limite de *backtrack* est atteinte, l'enfant correspondant est abandonné. Chaque enfant viable est ajouté à la population de la génération suivante.

Notre algorithme évolutionnaire sous contraintes issu de *SPEA2* ne travaille que sur des problèmes dont la structure ou nombre de variable n'est pas modifiée durant le traitement. Nous ne considérerons, en conséquence, que les CSP à structure statique dans nos travaux.

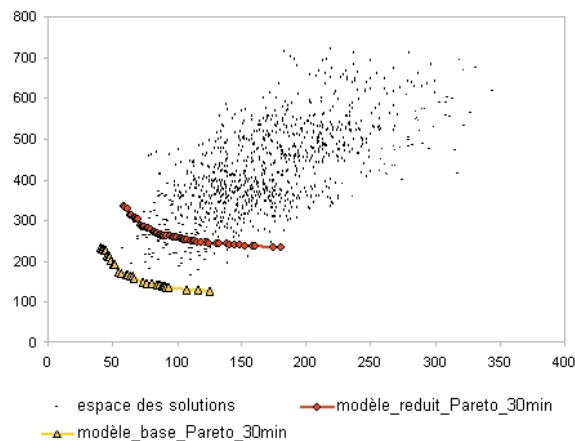


FIGURE 4.3 – Optimisation évolutionnaire sous contraintes



Dans le cadre du projet ANR ANR ATLAS (2007-2011), support des travaux de thèse de Mme M. Djefel [Djefel2010], nous optimisons simultanément un système configuré (avion) et sa gamme de fabrication en recherchant un compromis entre le coût de la solution et son délai d'obtention.

Le problème à optimiser est formalisé par deux *CSP* \star , le premier pour la configuration de système et le second pour la planification de la gamme de fabrication. Nous associons aux composants et options du système une variable de coût $\text{Coût}_{\text{Composants}}$ et aux opérations de la gamme une variable de coût $\text{Coût}_{\text{Activites}}$ et une variable de durée $T.pdt$. Les critères globaux à optimiser sont le coût global CG de la solution (coût composants + coût opérations) et le délai d'obtention DO (durée de la gamme). L'évaluation de ces deux critères, pour un individu, s'effectue en même temps que son élaboration, à chaque filtrage effectué pour maintenir sa cohérence. Plusieurs campagnes d'expérimentations ont été réalisées avec des problèmes plus ou moins contraints associés ou non à des besoins utilisateur préalablement exprimés (variables valuées). Celles-ci ont montré qu'il était tout à fait envisageable, en un temps raisonnable (quelques heures), d'obtenir un front de Pareto proche de l'optimal. Un exemple de résultats est illustré en figure 4.3.

Ces travaux ont été valorisés dans [Pitiot+2010b], [Pitiot+2012a], [Pitiot+2010a] *Best Paper Award* [Pitiot+2012b], [Pitiot+2013a] *Outstanding Paper Award*, [Pitiot+2013b] \star , [Pitiot+2014] \star .

4.3 Synthèse du chapitre



Cette deuxième thématique de recherche porte sur les méthodes d'exploitation des connaissances formalisées par des problèmes de satisfaction de contraintes. La configuration interactive nécessite l'utilisation de méthodes de filtrage de faible degré afin de garantir l'interactivité avec l'utilisateur et le retrait de l'espace des solutions, des valeurs devenues incohérentes avec le problème courant.

La diversité des connaissances rencontrées au fil des projets de recherche, nous conduit à assembler, utiliser, adapter et intégrer différentes méthodes de filtrage (arc-cohérence, $2B$ -cohérence, τ -AC-3 et activation) à notre moteur de filtrage générique associé à notre solution logicielle CoFiA.De.

Deux méthodes de filtrage spécifiques sont proposées :

- les contraintes numériques définies par morceaux sont représentées sous forme d'arbres quaternaires par l'ajout de 4 types de nœuds supplémentaires et de campagnes de propagation par voisinage. Leur exploitation est réalisée par l'utilisation de la méthode de filtrage par arc-cohérence τ -AC-3 des arbres quaternaires,
- les contraintes contextuelles sont paramétrées à partir de cas pertinents identifiés par un *CBR* et enrichis par une méthode prédictive d'association du *Data-Mining*. Cet enrichissement permet, d'une part, de préciser certaines valeurs de variables dans un contexte donné et, d'autre part, de fournir à l'utilisateur des recommandations quant aux choix des valeurs (fréquences d'occurrence).

Dans le cadre de nos travaux, nous souhaitons présenter à l'utilisateur un ensemble de solutions Pareto-optimales afin de l'assister dans sa prise de décision. Nous couplons ainsi les *CSP* à des algorithmes évolutionnaires afin de calculer, en un temps raisonnable, le front de Pareto. Le filtrage des contraintes intervient dans les étapes de génération cohérente d'individus, lors de la phase d'initialisation de l'algorithme, mais aussi, dans la phase d'engendrement de la nouvelle génération, dans les opérateurs de croisement et de mutation.

Ces travaux ont donné lieu à la publication de 5 articles *WoS** (CII 2014, IJPR 2013, EAAI 2012, EAAI 2009, IJCIM 2008) et 13 communications avec actes édités.

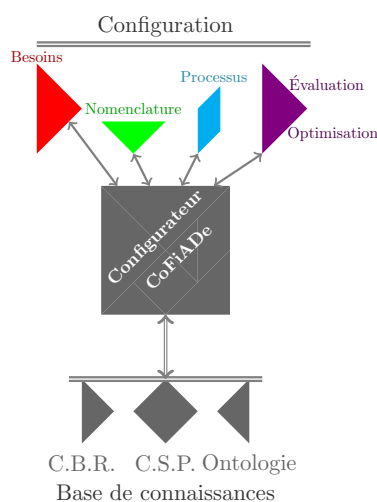
Nos travaux exploitant le filtrage des contraintes nous ont conduit à participer aux comités scientifiques d'une conférence relative au domaine de la Programmation par Contraintes avec les *Journées Francophones de Programmation par Contraintes* de 2009 à 2013 ainsi qu'aux comités d'organisation des *Journées Francophones de Programmation par Contraintes* en 2012 et de l'*International Conference on Principles and Practice of Constraint Programming* en 2016.

Un échange académique à Polytechnique de Montréal, Canada (2 semaines en 2011) nous permet de proposer aux utilisateurs des recommandations quant aux choix de valeurs par l'utilisation d'une méthode prédictive de *Data-mining*. Ces travaux ont été présentés dans le cadre de la revue finale du projet *A.N.R. blanc BR4CP* (2012-2015) pour *Business Recommendation for Configurable Products*⁶ porté par l'Institut de Recherche en Informatique de Toulouse, I.R.I.T., en avril 2015.

L'ensemble de ces travaux nous a conduit à participer au jury de thèse en tant qu'examinatrice de M. Nicolas Schmidt, *Compilation de connaissances - application à la configuration de produits* qui se soutiendra en septembre 2015 à l'université d'Artois.

6. [http://www.agence-nationale-recherche.fr/suivi-bilan/editions-2013-et-anterieures/recherches-exploratoires-et-emergentes/blanc-generalite-et-contacts/blanc-presentation-synthetique-du-projet/?tx_lwmsuivibilan_pi2\[CODE\]=ANR-11-BS02-0008](http://www.agence-nationale-recherche.fr/suivi-bilan/editions-2013-et-anterieures/recherches-exploratoires-et-emergentes/blanc-generalite-et-contacts/blanc-presentation-synthetique-du-projet/?tx_lwmsuivibilan_pi2[CODE]=ANR-11-BS02-0008)

Configuration interactive et Extensions



globale au sein des entreprises.

La large diversité des produits offerte aux clients (fonctions, variantes et options) impacte directement leur nomenclature physique mais se répercute aussi sur leur gamme de fabrication, gamme de maintenance ou leur documentation. Désormais, le processus de configuration ne doit plus se concentrer uniquement sur la définition des produits mais doit s'étendre aux autres activités et processus de l'entreprise. La configuration a été, tout d'abord, étendue des composants et leur nomenclature, aux activités directement amont et aval, à savoir la configuration des besoins utilisateur et la configuration du processus de réalisation. D'autres processus plus amont et plus aval (assemblage, maintenance, recyclage ...) doivent désormais être considérés pour, d'une part, gérer au mieux leur diversité et, d'autre part, améliorer la prise de décision

Premièrement, l'extension de la configuration aux autres processus implique que l'évaluation des solutions ne porte plus uniquement sur le critère de prix de vente. Dans nos travaux, d'autres critères de performance (intensité de distorsion, performance thermique ...) de l'objet configuré (procédé, rénovation ...) et des critères issus d'autres activités (durée d'immobilisation ou de fabrication) sont ainsi considérés.

Deuxièmement, afin de prendre en considération l'ensemble du cycle de vie des produits, nous étendons l'activité de configuration à des activités plus amont (constitution du modèle de connaissances, réponse à appel d'offres) et des processus plus aval (assemblage ou maintenance) ou connexes (documentation). Nous proposons également des règles de synchronisation entre le processus de configuration (étendue à la conception) et le processus de réalisation (étendue au projet), afin de garantir leur cohérence et détecter au plus tôt les problèmes mettant en jeu leur bon déroulement.

Ce chapitre présente, dans un premier temps, les différentes extensions de la configuration, des critères de performances aux autres processus de l'entreprise. Puis, dans un second temps, nos

apports et contributions scientifiques, relatifs à l'extension de la configuration interactive, sont positionnés dans leur contexte industriel (projet de recherche), international (collaboration avec des chercheurs étrangers) et scientifique (thèses de doctorat, publications *WoS** et communications avec actes édités).

5.1 Configuration étendue

Nous présentons dans cette section les différentes extensions de la configuration. Premièrement, l'évaluation des solutions ne se focalise plus seulement sur le prix de vente, mais d'autres critères de performance sont pris en compte. Deuxièmement, l'objet configuré ne concerne plus uniquement le produit fini et sa nomenclature, mais son modèle générique. Troisièmement, la configuration de produit est maintenant étendue au processus de réalisation.

5.1.1 Du Prix à la Performance

La configuration de produits ou *Mass Customization* a pour objectif premier, de fournir à un client le produit (ou système ou service) qu'il désire, au moment où il le souhaite et au prix qu'il est prêt à payer [Anderson+1996], [Pine1999], [Tseng+2007], [Piller+2014]. Le prix de vente du produit configuré est donc le critère clé à évaluer, la performance résultant principalement des choix de composants, réalisés directement par le client ou déduit par le configurateur. Ce prix de vente n'a, généralement, qu'un caractère informationnel et le client n'a aucune prise possible sur celui-ci, comme, par exemple, limiter le prix maximal.

À notre connaissance, seuls les travaux de [Wang+2011] permettent à la fois de configurer interactivement un ordinateur, d'évaluer, au fil de la configuration, son prix et de contraindre celui-ci. La limitation du prix du produit par le client est répercutée sur la nomenclature physique, par le retrait de certains composants ou certaines options.

Les travaux de [Nikolaidou+2002] portent, quant à eux, sur la configuration (en phase de conception) d'un site *Web* à partir de composants (ou modules) logiciels standards. Le prix de la solution n'est pas le critère déterminant mais le temps de réponses du site et ses fonctionnalités le sont. Le site *Web* est configuré dans un premier temps, puis une simulation par événements discrets est lancée afin d'évaluer le temps de réponses et les fonctionnalités offertes aux clients.

L'extension de la configuration à d'autres objets que le produit fini (site *Web*, maintenance ...) modifie l'identité de l'utilisateur, du client novice au concepteur expert [Stumptner1997], et par conséquent le besoin d'évaluation : le prix est toujours, le plus souvent, considéré mais l'évaluation est complétée par d'autres critères (temps de réponse, durée de maintenance ...). Nos travaux intègrent ces nouveaux besoins d'évaluation liés directement à l'objet configuré.

5.1.2 Du produit au Modèle Générique

Dans un contexte de personnalisation accrue des produits et de définition de familles de produits, la configuration peut être étendue à l'activité amont de constitution du modèle générique de connaissances. À partir de fragments de connaissances générales formalisés par des *CSP*, l'activité de configuration consiste à assembler ceux-ci (à partir de la description du produit ou famille de produits) et à définir un modèle générique, couvrant tout ou partie, de l'espace des solutions. L'activité de configuration de produit peut alors débiter afin d'aider au mieux les concepteurs dans leurs prises de décision.

À notre connaissance, seuls les travaux de [Yvars+2012] portent sur cette activité amont. Leur approche propose, à partir de la définition hiérarchique d'une famille de produits, d'établir le modèle générique comme un *CSP* discrets à structure statique. Le *CSP* est ensuite exploité, de manière interactive, pour aider à la décision en conception préliminaire de produits (dans ces travaux, un échangeur thermique).

Nos travaux s'inscrivent, en partie, dans la continuité des travaux de [Yvars+2012] mais structurent la connaissance à l'aide d'ontologies de concepts et exploitent pleinement la structure hiérarchique de la nomenclature physique.

5.1.3 Du Produit à la Production et Documentation

La configuration de produit s'est naturellement étendue au processus directement aval, le processus de production [Tiuhonen+1996], [Veron2001], [Hvam+2002] et connexe, la documentation [Rabiser+2014]. En effet, la diversité liée aux produits engendre une diversité au niveau de leur processus de production : il faut alors identifier, parmi les options et variantes de la gamme de production, l'ensemble des activités à réaliser pour produire les produits configurés. De plus, la diversité liée aux produits a un impact direct au niveau de leurs documentations (offres, contrats, manuel utilisateur et documentation technique).

La configuration du processus de production ne pose pas de problème particulier, à partir du moment où son modèle générique est défini : activités, sous-processus, relations temporelles entre les activités [Tiuhonen+2014]. Celui-ci doit alors être relié au modèle générique du produit afin de pouvoir répercuter les choix réalisés (choix de composants et options) et déterminer les activités à réaliser pour fabriquer et assembler les composants.

Les travaux de [Zhang+2012b] et [Campagna+2013] portent sur la configuration simultanée, à base de contraintes, du produit et du processus de production. Dans les travaux de [Zhang+2012b], quatre domaines sont considérés : le produit, les composants, les activités, associées à des durées discrètes, et les ressources (machines). Tous ces domaines sont inclus dans un unique modèle de connaissances. Les *CSP* discrets à structure statique sont exploités afin de lier les composants aux activités du processus de production. L'ensemble des opérations à réaliser est ainsi déterminé et le temps de production est estimé dans l'absolu (sans contraintes de ressources).

Dans les travaux de [Campagna+2013], les *CSP* discrets à structure statique sont aussi exploités. Deux modèles génériques sont considérés : un modèle générique de la nomenclature du produit, caractérisé par des composants paramétrables et leur cardinalité maximale autorisée, et un modèle générique du processus de production, composé d'activités caractérisées par une durée, des ressources et éventuellement un nombre maximal d'exécution. Les activités peuvent être, de plus, optionnelles et sont alors associées à un *flag* indiquant leur exécution (durée non nulle) ou non-exécution (durée nulle). Les deux modèles sont reliés par des contraintes discrètes liant les composants aux activités (modulant ainsi leur durée) ou à leur nombre d'exécutions. Ces travaux considèrent la capacité limitée des ressources (via le nombre maximal d'exécution des opérations) pour déterminer l'ensemble d'opérations obligatoires et optionnelles, et évaluer le temps de production.

Au niveau de la configuration de la documentation technique, seuls les travaux de [Rabiser+2014] ont étendu la configuration à la documentation. Un modèle générique de la structure du document est implémenté à l'aide de l'outil DOPLER [Dhungana+2011]. De la description du produit (décrite à partir de variables de décision clé) est générée la structure du document Microsoft Word correspondante.


Contrairement aux travaux de [Zhang+2012b] et [Campagna+2013], nous utilisons des *CSP* mixtes et temporels à structure dynamique pour formaliser le processus (ou projet) de production (ou réalisation). Et contrairement aux travaux de [Rabiser+2014], la documentation n'est pas considérée comme un résultat de la configuration de produit, mais elle est construite simultanément avec de la définition de la nomenclature.

5.2 Apports et Contributions Scientifiques


Nos travaux de recherche couvrent une large part du cycle de vie des produits : de leur conception à leur maintenance. Ce spectre large nous amène à étendre la configuration de la constitution des modèles génériques, au plan de maintenance, en passant par la génération de réponse à appels d'offres. L'évaluation des solutions est donc maintenant multi-critère, l'aide apportée inclut les processus amont et aval de l'activité de configuration, et des règles de synchronisation entre ces processus sont établies, afin de garantir l'atteinte des objectifs initiaux.

Ce chapitre présente l'ensemble de ces contributions en les positionnant dans leur contexte industriel, scientifique (thèses de doctorat, articles *WoS** et communications avec actes édités) et international.

5.2.1 Du Prix à l'Évaluation Multi-Critère

 L'extension de la configuration à des objets différents du produit (procédé de fabrication, processus de production, maintenance ...) engendre des besoins d'évaluation autre que celle, exclusive, du prix de vente. La configuration peut porter sur un objet unique (produit, système, procédé, processus) ou sur une combinaison d'objets (produit-processus). Dans le premier cas, l'évaluation des solutions est mono-critère et porte soit sur le prix de vente ou sur une performance (intensité, durée, etc). Dans le second cas, l'évaluation est multi-critère, avec des critères parfois antagonistes, et se définit par une juxtaposition de critères du produit (prix, performance) et de critères issus d'autres processus (prix, durée, etc).

Nous présentons, dans cette section, de manière chronologique, une synthèse des différentes évaluations (autre que prix de vente) utilisées dans chacune de nos applications industrielles :

 V.H.T. Le projet européen VHT (2002-2005), support de mes travaux de thèse [Vareilles2005], portait sur la configuration d'opérations de traitement thermique et l'estimation des distorsions en résultant. Dans le cadre de ce projet, seule l'intensité de déformation des pièces après traitement thermique était évaluée.

Les déformations après traitement thermique dépendent à la fois de la géométrie et du matériau de la pièce trempée (trou débouchant, épaulement, acier 30CrNiMo8 ...), et du procédé de traitement thermique utilisé (fluide de tremp, orientation, temps de chauffe ...). Dans le cadre de ce projet, cinq types de déformations ont été identifiés pour la famille des axes (bobine-tonneau, ovalisation ...). Pour chacune, l'intensité de déformation est évaluée à partir d'une intensité potentielle de déformation (liée principalement aux caractéristiques de la pièce) et de coefficients de modulation amplifiant ou réduisant celle-ci (liés principalement au procédé).

L'évaluation repose sur un modèle de connaissances, dont l'architecture est présentée en figure 5.1, composé de vingt variables caractérisant la pièce (géométrie et matériau) $\{P_1\}$, soixante-dix de variables caractérisant le procédé de traitement thermique $\{P_2\}$, de vingt-six coefficients de modulation m^j dont le produit appartient à l'intervalle $[1, 50]$, de cinq intensités potentielles de

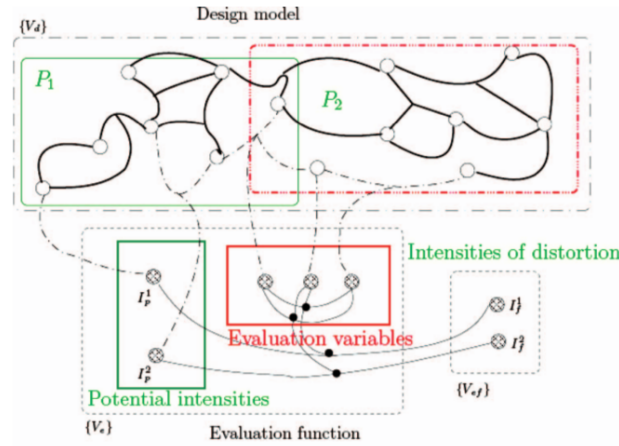


FIGURE 5.1 – Évaluation de l'intensité de distortion

déformation I_p^i comprises dans l'intervalle $[1, 20]$ et de cinq intensités finales de déformation I_f^i comprise dans l'intervalle $[1, 1000]$ (1 déformation minimale et 100 déformation maximale) :

$$D = \bigcup_{i=1}^5 D_i : I_f^i = I_p^i \times \prod_{j=1}^{26} m^j$$

La sélection d'une valeur de paramètre pour le procédé de traitement thermique (choix du matériau, par exemple) implique la mise à jour des intensités de déformation des D_i , et inversement, une restriction sur une intensité de déformation $D_i \leq 520$ a un impact sur la configuration du procédé (choix du fluide de trempe, par exemple). Cependant, lors du rendu final du projet, les experts du domaine nous ont fait remarquer, à juste titre, que la minimisation des déformations n'a que peu d'impact sur la dureté mécanique en surface du matériau trempé. Par conséquent, deux critères antagonistes auraient donc dû être considérés : l'intensité de déformation D_i et la dureté surfacique résultants de procédé de trempe.

Ces travaux ont été valorisés dans [Vareilles+2004], [Lamesle+2005], [Vareilles+2006], [Aldanondo+2006d], [Vareilles+2007a]*, [Aldanondo+2006b].



Dans le cadre du projet ANR ATLAS (2007-2011), et plus particulièrement les travaux de thèse de Mme M. Djefel [Djefel2010], l'évaluation est multi-critère et porte à la fois sur des critères liés au produit (coût) et des critères liés au processus de réalisation (coût et durée).

Dans le cadre de ce projet, la configuration porte à la fois sur le produit fini (ici, un avion de tourisme et d'affaire) et sur son processus de réalisation. Deux modèles de connaissances, à structure statique, sont reliés par des contraintes de couplage qui permettent de répercuter un choix relatif au produit (choix d'une option, par exemple) sur le processus de réalisation (ajout de l'activité associée) et inversement. Une exigence forte au niveau du délai d'obtention du produit (date de livraison spécifiée) a ainsi un impact sur la nomenclature du produit en interdisant la sélection de composants ou l'ajout d'options.

Le modèle de connaissances, dont l'architecture est présenté en figure 5.2, mêle donc des entités (fonctions, composants, options, activités) relatives aux deux domaines :

Coté Produit Le problème de configuration de produit met en œuvre des fonctions, composants et options, associés pour certains à un coût $\text{Coût}_{\text{Composants}}$,

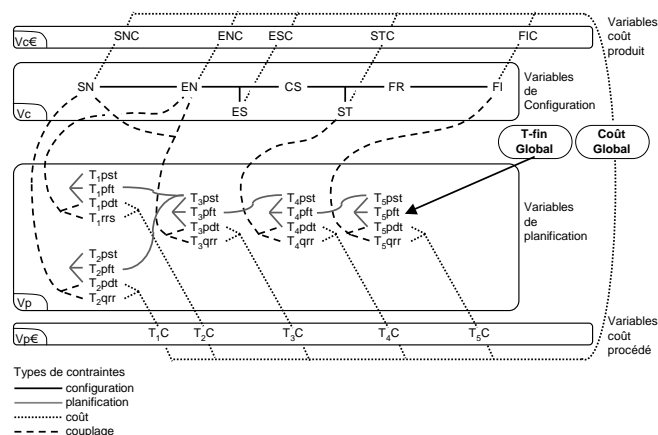


FIGURE 5.2 – Évaluation du couple produit et processus de réalisation

Coté Réalisation Le problème de planification de la production met en œuvre six activités caractérisées chacune par une date de début $T.pst$, une date de fin, notée $T.pft$, une durée notée $T.pdt$, une quantité de ressource $T.rss$ et un coût $\text{Coût}_{\text{Activites}}$, noté T_iC en figure 5.2.

L'évaluation du couple (produit-processus) est réalisé sur deux critères globaux :

- le coût global de la solution correspondant à la somme des coûts produit et processus : $CG = \sum \text{Coût}_{\text{Composants}} + \sum \text{Coût}_{\text{Activites}}$
- le délai d'obtention : DO = date de fin au plus tôt de la dernière activité (ici, T_5).

Ce couple peut être optimisé par l'algorithme évolutionnaire *SPEA2* présenté dans la sous-section 4.2.4.

Ces travaux ont été valorisés dans [Pitiot+2013b]*.



Le projet FUI HÉLIMAINTEANCE (2008-2011), support des travaux de thèse de M. A. Codet de Boisse [Codet de Boisse2013], portait sur la configuration de la maintenance d'hélicoptères civils afin de minimiser leur temps d'immobilisation au sol. Dans le cadre de ce projet, seul le temps d'immobilisation au sol de l'hélicoptère est évalué.

La gamme de maintenance d'un hélicoptère doit être établie à chaque fois que l'une de ses pièces atteint l'une de ses limites calendaires ou cycliques d'utilisation. Chaque pièce a sa propre gamme de maintenance décrite dans le *M.R.B.* et peut être montée, au cours de sa vie, sur plusieurs appareils. Le *M.R.B.* définit le modèle générique de la gamme de maintenance, en précisant pour chaque opération sa durée théorique. Afin de préciser au mieux la durée d'immobilisation de l'appareil, nous prenons en compte au niveau de chacune des pièces à maintenir, des connaissances supplémentaires liées aux maintenances passées.

L'évaluation du temps d'immobilisation ou durée de la maintenance repose sur un modèle de connaissances hiérarchique, dont l'architecture est présentée en figure 5.3. Ce modèle détermine à partir de connaissances générales, législatives et réglementaires, un temps théorique de maintenance de chacune des pièces à maintenir d_{th} . Cette durée d'immobilisation est ensuite affinée et rendue plus réaliste des , à partir de connaissances issues des maintenances passées (via des contraintes contextuelles présentées en sous-sections 3.2.4 et 4.2.3). L'ensemble des opérations et des durées estimées des_i est ensuite consolidé au niveau de l'hélicoptère afin de déterminer sa gamme de maintenance et sa durée d'immobilisation probable des , définie à l'aide des maintenances passées.

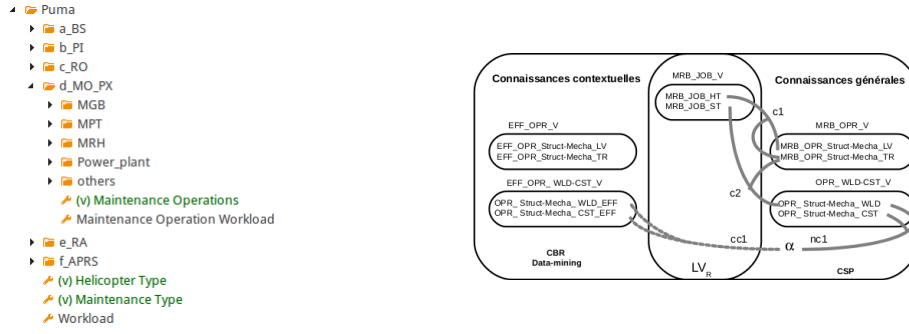


FIGURE 5.3 – Évaluation de la durée d'immobilisation

Ces travaux ont été valorisés dans [Codet de Boisse+2010], [Vareilles+2012a]*. Dans le cadre de ces travaux, le séjour à l'école Polytechnique de Montréal a permis de définir comment prendre en compte, à bon escient, les connaissances contextuelles dans le processus de configuration : exploiter la *Confiance* des règles comme recommandation de valeurs à l'utilisateur.

C.R.I.B.A.

Rénovation
Bâtiment

Le projet ADEME CRIBA (2012-2015), support des travaux de thèse de M. A.-F. Barco Santa porte sur la configuration de rénovation de bâtiments par l'extérieur à partir de panneaux préfabriqués paramétrables.

Dans le cadre de ce projet, l'évaluation des solutions est multi-critère et porte, à la fois, sur le prix de la solution (coût des composants et coût de main d'œuvre) et sur sa performance (performance thermique après rénovation).

Le concept de rénovation de bâtiments par l'extérieur consiste à recouvrir totalement les bâtiments par une nouvelle enveloppe composée, dans notre cas, de panneaux multifonctionnels, rectangulaires et préfabriqués en usine. Chaque panneau de dimensions variables ($[d, \bar{d}]m$), de surface variable ($[s, \bar{s}]m^2$) et d'épaisseur variable (de $[e, \bar{e}]cm$) peut inclure différents équipements (menuiseries, panneaux photovoltaïques, etc). Ces panneaux sont dimensionnés, un à un (manuellement ou non), au fil de la configuration. À chaque fois qu'un nouveau panneau est posé en façade, son coût de revient C_{pr} (coût de la matière première) et son coût de montage C_{pm} (lié aux caractéristiques du chantier et au poids du panneau) sont estimés.

Dès qu'une façade est totalement recouverte de panneaux, son coût C_F et sa performance thermique H_F peuvent être calculés, tel qu'illustré en figure 5.4. Le coût de la rénovation de la façade C_F est calculé comme la somme des coûts de chaque panneau multifonctionnels constituant la façade rapportée : $C_F = \sum_{x=1}^{FacadePanelNumber} (C_{xr} + C_{xm})$

La performance thermique d'une façade H_F est calculée à partir de la surface S_{px} de chaque panneau multifonctionnel la composant $FacadePanelNumber$ et de son coefficient de transfert thermique surfacique U_p en $W.m^{-2}.K^{-1}$, du linéaire de jonctions L entre panneaux et leur coefficient de transfert thermique linéique Ψ en $W.m^{-1}.K^{-1}$ et du nombre de ponts thermiques ponctuels nb et leur coefficient de transfert thermique ponctuel χ en $W.K^{-1}$: $H_F = \sum_{x=1}^{FacadePanelNumber} U_{px} * S_{px} + \Psi * L + \chi * nb$

Ces travaux ont été valorisés dans [Barco Santa+2014a], [Barco Santa+2015], [].

5.2.2 Du produit aux Modèles Génériques

C.S.P.
Base de connaissances

La configuration peut s'étendre à des activités très amont : la configuration du modèle générique de connaissances, avant son exploitation. Deux cas de figures peuvent se présenter :

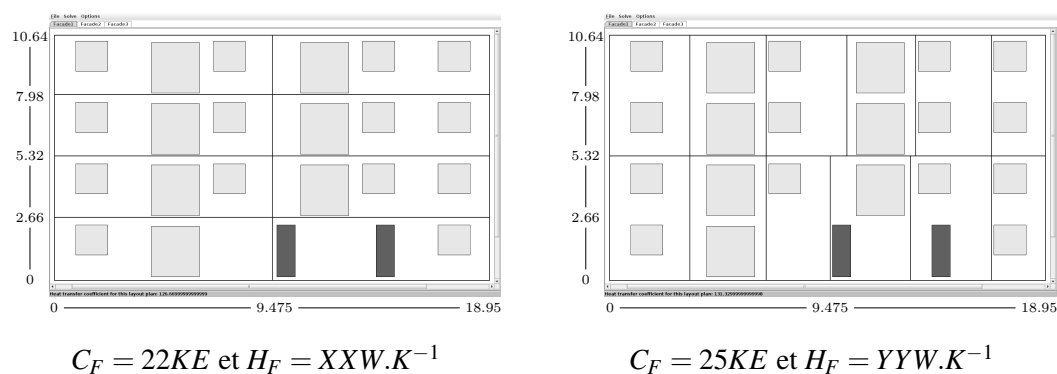


FIGURE 5.4 – Évaluation de la configuration de la rénovation de façade

- le modèle générique est généré une fois pour toute avant la configuration de l'objet considéré (cas de la configuration) [Yvars+2012],
- il est construit et complété au fil de la configuration (cas de la conception « moins » routinière).

Dans les deux cas, des modèles de connaissances sont assemblés, de manière cohérente, et reliés, soit par l'utilisateur ou par des connaissances directement embarquées dans les modèles, afin de pouvoir exploiter le modèle générique dans sa totalité.

C.R.I.B.A.



Renovation
Bâtiment

Dans le projet ADEME CRIBA (2012-2015), support des travaux de thèse de M. A.-F. Barco Santa, le modèle générique supportant la rénovation est construit à partir de la description complète du chantier à rénover. Le processus de configuration de la rénovation se déroule suivant un *travelling optique avant* partant du chantier et arrivant aux façades. En effet, le chantier est composé de bâtiments, eux mêmes composés de blocs, chacun étant composé de façades [Vareilles+2013a]. À chaque niveau et pour chaque élément (chantier, bâtiment, bloc, façade), une série de questions descriptives est posée à l'utilisateur. Chaque réponse a un impact potentiel sur la surface, les dimensions et le poids admissibles des panneaux multifonctionnels pour l'élément considéré. Par exemple, l'inaccessibilité d'une façade limite la taille des panneaux multifonctionnels et, par conséquent, la surface couverte par chacun d'eux. Lorsque l'ensemble des réponses ont été saisies, le processus de configuration peut débiter.

À chaque élément (chantier, bâtiment, bloc, façade) est associé un modèle générique, formalisé comme un *CSP*, permettant de répercuter les restrictions portant sur les panneaux, hiérarchiquement, du chantier jusqu'aux façades. Les éléments héritent, en effet, des domaines de cohérence définis aux niveaux supérieurs, et ne peuvent que réduire les domaines admissibles. Le modèle générique de la rénovation est construit, avant l'activité de configuration, à partir d'un fichier descriptif du chantier, généré suite au relevé 3D des bâtiments à rénover (par télémètre laser, par exemple) et leur modélisation numérique stockée dans un *Building Information Model* ou *BIM*, tel qu'illustré en figure 5.5.

Ces travaux ont été valorisés dans [Vareilles+2013a], [Barco Santa+2014a], [Aldanondo+2014].

A.T.L.A.S.



Conception
Avion

Dans le cadre du projet ANR ATLAS (2007-2011), et plus précisément les travaux de thèse de M. J. Abeille [Abeille2011], le modèle de connaissances est construit au fur et à mesure de la conception de système. Le modèle générique du système à concevoir repose sur une ontologie de concepts, structurant les connaissances du domaine, formalisées comme un *CSP*, cf sous-section 3.2.2. L'utilisateur, ou

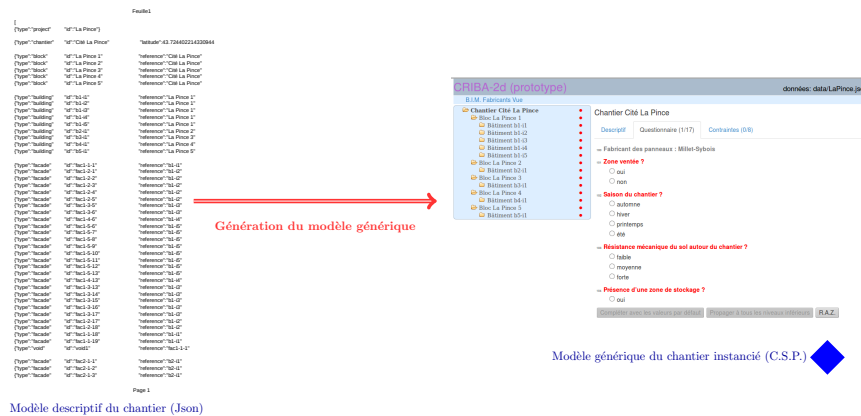


FIGURE 5.5 – Génération du modèle générique à partir d'un fichier de description

concepteur, commence ainsi sa conception, par le choix d'un concept associé au système qu'il est en train de concevoir. Si un concept est trouvé dans l'ontologie, le CSP associé est instancié : l'ensemble des variables, domaines et contraintes inhérents au concept sont ajoutés. Le concepteur peut alors configurer, partiellement ou totalement (en fonction des connaissances formalisées et portées par le concept), son système et si besoin, compléter sa définition par l'ajout de connaissances supplémentaires.

Si le système s'avère trop complexe, le concepteur peut choisir de le décomposer en sous-systèmes plus simples. De nouveau, il associe, à chacun d'un, un concept de l'ontologie. Les CSP associés sont alors instanciés au niveau hiérarchique correspondant. Le concepteur peut relier les modèles génériques, sur plusieurs niveaux, par l'ajout explicite de contraintes inter-niveaux, tel qu'illustré en figure 5.6. Ces nouvelles contraintes permettent de propager une décision prise à n'importe quel niveau de la nomenclature, verticalement, à l'ensemble des composants.

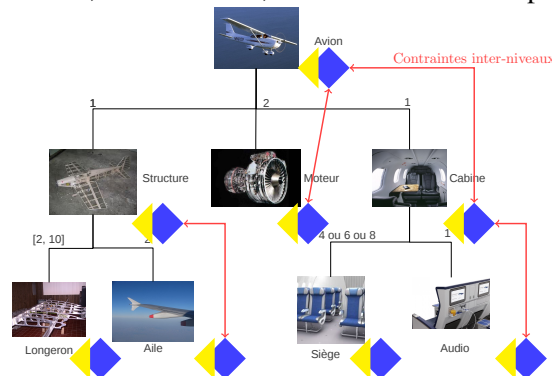


FIGURE 5.6 – Construction descendante du modèle générique

Ces travaux ont été valorisés dans [Abeille+2010], [Pitiot+2010a] *Best Paper Award*.

5.2.3 Du Produit aux Processus

Afin de prendre en considération l'ensemble du cycle de vie des produits, nous étendons l'activité de configuration à d'autres activités et processus de l'entreprise. La diversité offerte aux clients engendre une large diversité au niveau de l'ensemble des processus de l'entreprise (fabrication, assemblage, maintenance, recyclage) [Zhang2014]. Cette

diversité doit, elle aussi, être supportée par des outils d'aide à la décision. De plus, les différents processus ne peuvent plus être considérés comme indépendants les uns des autres : les choix réalisés au niveau d'un processus ou d'une activité (choix de fournisseur, par exemple) doivent être propagés à l'ensemble des processus aval, amont et connexes (limitation des composants, paragraphe spécifique dans la documentation, activités spécifique de recyclage) afin de trouver une solution globale cohérente et satisfaisante [Aldanondo+2006c], [Aldanondo+2008a]*.

Dans nos travaux de recherche, la configuration de produits est étendue à des processus aval, le processus de réponse à appel d'offres et la rédaction de la proposition, et amont, le processus d'assemblage des composants. Dans un cadre moins routinier, nous configurons, dynamiquement, simultanément et de manière descendante, la nomenclature physique du système et son projet de réalisation.



Le projet FUI 2II-MCO (2014-2015) porte sur la configuration de réponse à appel d'offres pour le câblage de grue portuaire tant du point de vue de la solution que de sa documentation. Face à l'accroissement de la concurrence, à l'instabilité de l'environnement économique, l'acquisition de produits passe de plus en plus souvent par des mécanismes d'appel d'offres ou AO. La procédure d'appel d'offres permet au maître d'ouvrage de faire le choix de l'entreprise soumissionnaire la plus à même de réaliser une prestation de travaux, fournitures ou services [Benaben2009]. La réponse à AO est un processus [Chalal+2006] qui s'intègre dans une démarche globale de conception de produit [Botero Lopez2014].

Dans le cadre du projet FUI 2II-MCO, l'entreprise soumissionnaire pré-conçoit, plus ou moins en détails en fonction du maître d'ouvrage, le câblage de grues portuaires à partir d'un catalogue de composants standards, optionnels et paramétrables, et du cahier des charges de l'AO. Puis une fois la solution de câblage définie, l'offre est rédigée (document et prix de vente). Les offres ont toujours la même structure, présentation de l'entreprise, présentation de la solution de manière globale puis de manière détaillée, mais doivent être particularisées au concept retenu et à sa nomenclature. Au regard du nombre important de réponses à appel d'offres, reposant majoritairement sur un seul expert du domaine, il arrive, malheureusement trop souvent, que certains détails techniques soient oubliés ou erronés lors de la rédaction de l'offre.

Afin de remédier à ce problème et gérer au mieux la diversité des solutions de câblage, la définition de la structure de l'offre est réalisée en parallèle de la définition de la solution. L'ajout d'un composant dans la nomenclature implique l'ajout d'une section permettant la description de ce composant ainsi que sa localisation précise sur la grue. La décomposition d'un composant en sous-composants entraîne l'ajout des sous-sections correspondantes. Le concepteur peut ainsi avoir une vue symétrique et parallèle de la solution et de sa documentation, comme illustré en figure 5.7.

Ces travaux n'ont pas encore été valorisés à ce jour.



Le projet ADEME CRIBA (2012-2015), support des travaux de thèse de M. A.-F. Barco Santa porte sur la configuration de rénovation de bâtiments par la définition de la nomenclature physique de la façade rapportée et de sa gamme de montage sur site. Une fois la configuration de la rénovation réalisée (nomenclature physique définie), la gamme de montage de la nouvelle façade (ou façade rapportée) doit être établie. Celle-ci n'est pas définie en parallèle de la définition de la solution mais après coup, car il peut être décidé, afin de réduire les coûts d'utilisation des grues sur le chantier ou de limiter les interventions chez les habitants, de réaliser la pose des éléments (fixations et panneaux), de manière simultanée, sur plusieurs façades.

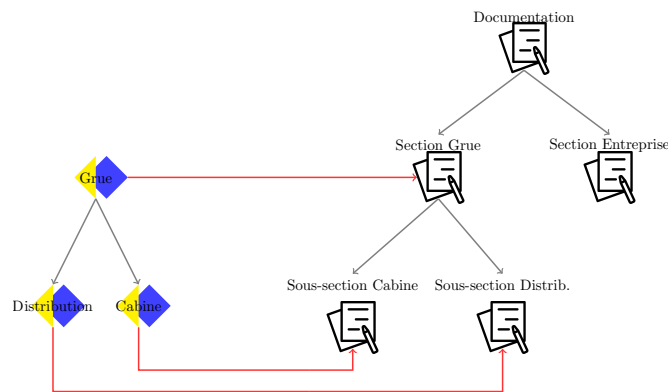
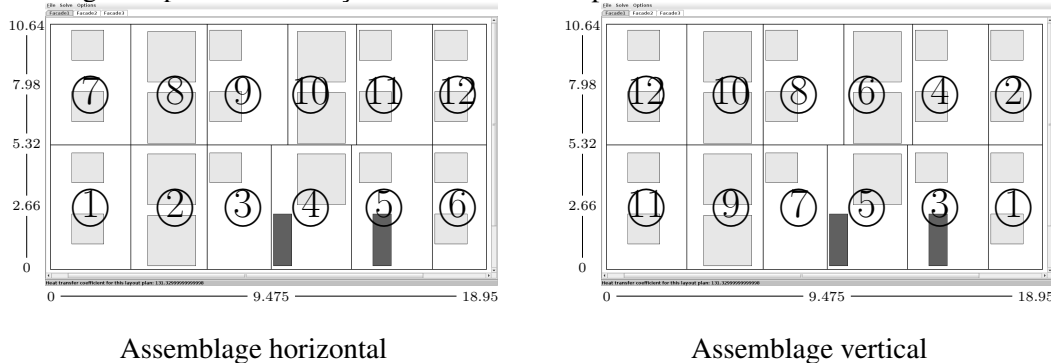


FIGURE 5.7 – Nomenclature et Documentation

Cette gamme de montage est générée de la manière suivante, tel qu’illustré sur la figure 5.8 :

- les fixations sont toutes posées et calées, de manière horizontale en commençant par les deux extrémités, sur chaque façade du bas vers le haut.
- les panneaux sont ensuite posés en façade en respectant les contraintes suivantes :
 - un panneau ne peut pas être fixé en hauteur si les panneaux du dessous n’ont pas été eux-mêmes posés,
 - le premier panneau est toujours posé en bas de la façade (coin droit ou gauche), puis le suivant est posé horizontalement (à côté du panneau) ou verticalement (au dessus du panneau), et ainsi de suite, jusqu’à ce que tous les panneaux soient posés.

La calepinage des façades et leur nomenclature physique ont donc un impact important sur l’ordre de montage des panneaux en façade et sur le coût de pose lié au chantier.



Assemblage horizontal

Assemblage vertical

FIGURE 5.8 – Nomenclature et Assemblage

Ces travaux ont été valorisés dans [Aldanondo+2014], [Barco Santa+2014a], [Barco Santa+2014b].

A.T.L.A.S. Le projet ANR ATLAS (2007-2011), support des travaux de thèse de Mme M. Djefel [Djefel2010] et de M. J. Abeille [Abeille2011], portait sur le couplage entre les processus de conception de systèmes et de planification du projet de conception. Le modèle générique supportant ce couplage est défini au fur et à mesure de la décomposition du système en sous-systèmes et du projet en sous-projets. Il repose sur d’une part, les concepts de l’ontologie associés à des connaissances formalisées comme un CSP, cf. sous-section 3.2.2, et d’autre part sur une bijection structurelle entre la nomenclature du système et la décomposition du projet.

La bijection structurelle adoptée est en complète cohérence avec les travaux du domaine : la conception axiomatique ou *Axiomatic Design* [Suh1990] et son approche zigzaguant itérative ment

et progressivement entre les besoins client, la nomenclature du système, les tâches et les ressources du projet, les travaux de [Lu+2008] qui formalisent les liens entre la nomenclature du produit ou *PBS*¹ et le *WBS*² du projet à l'aide de matrice, et les travaux de [Sharon+2008], [Sharon+2009] qui proposent une méthodologie *PPLM* pour *Project Product Lifecycle Management* pour lier le produit conçu à son projet de réalisation.

Dans nos travaux, nous couplons de manière bijective et dynamique, à tous les niveaux de la nomenclature du produit et du graphe de projet, tel qu'illustré en figures 5.9 et 5.10 :

- un système S avec un projet $P \Rightarrow$ les deux *CSP* associés aux concepts, choisis pour le système et le projet, sont instanciés et reliés par des contraintes de compatibilité portant sur des variables caractérisant le système et le projet,
- l'ensemble des besoins et des exigences du système SR avec la tâche de recueil des besoins et des exigences PR , sans association de concept particulier,
- une alternative de solution système SA avec une tâche de développement d'alternative $PA \Rightarrow$ les deux *CSP* associés aux concepts, choisis pour l'alternative de solution système et la tâche de développement, sont instanciés et reliés par des contraintes de compatibilité portant sur des variables caractérisant l'alternative et la tâche associée.

Les contraintes de couplage permettent de propager un choix de conception au niveau d'une alternative système (nombre de personnes transportées, par exemple) sur le projet de réalisation associé (durée de la tâche de montage impactée), et inversement, du projet de réalisation (choix d'un fournisseur, par exemple) sur la conception de l'alternative concernée (réduction du nombre de références de composants).

Lorsque l'alternative de solution système est trop complexe à concevoir, elle est décomposée en sous-systèmes. Afin de préserver la bijection structurelle, les tâches et projets correspondants aux sous-systèmes à concevoir sont automatiquement générés et liés aux entités système correspondantes.

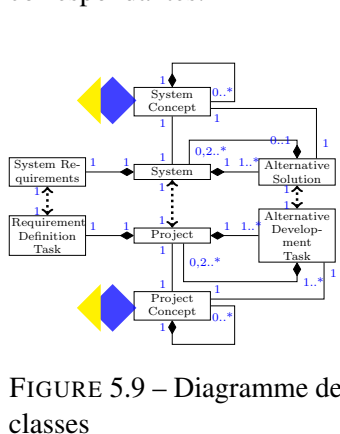


FIGURE 5.9 – Diagramme de classes

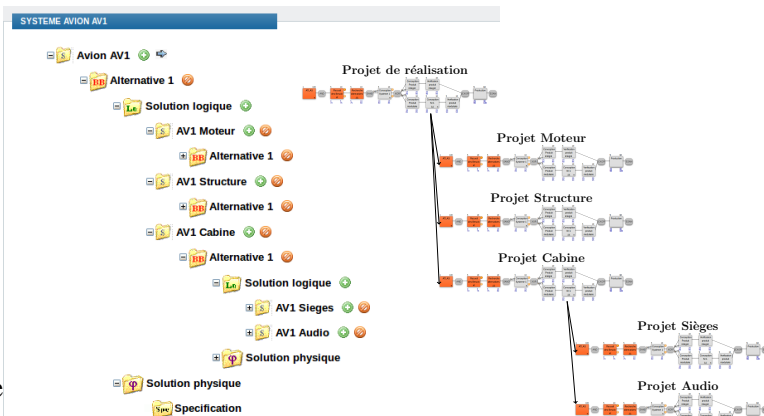



FIGURE 5.10 – Plateforme ATLAS

Ces travaux ont été valorisés dans [Baron+2006] [Aldanondo+2007b], [Aldanondo+2007a], [Vareilles+2007b], [Zolghadri+2007], [Aldanondo+2009], [Aldanondo+2010b], [Coudert+2011b], [Vareilles+2012b], [Zhang+2012a], [Zhang+2013]*, [Pitiot+2014]*. Cette thématique a fait l'objet de l'organisation de 4 sessions spéciales dans des congrès internationaux (2014, 2012, 2011, 2010).

1. *Product Breakdown Structure*
2. *Work Breakdown Structure*

5.2.4 À la Synchronisation des Processus

 La cohérence entre le processus de conception et le processus de réalisation est un facteur déterminant pour la réussite des projets : détecter, le plus tôt possible, une déviation dans l'atteinte des objectifs initiaux (de conception ou de réalisation), permet aux concepteurs et aux managers de réagir de manière appropriée pour palier aux problèmes rencontrés. Une synchronisation des processus est donc nécessaire, afin de surveiller leur bon déroulement et alerter, dans les meilleurs délais, les interlocuteurs adéquats. À notre connaissance, les travaux portant sur le couplage de la conception avec le projet de réalisation [Lu+2008], [Sharon+2008], [Sharon+2009], [Zhang+2012b] et [Campagna+2013] n'apportent aucune solution à ce problème de synchronisation.

Nous définissons, par conséquent, deux attributs d'états caractérisant la faisabilité Fa et la vérification Ve des entités système et projet :

Faisabilité Fa : la faisabilité est l'aptitude d'un produit, processus ou service étudié, à être élaboré techniquement et dans des conditions économiques satisfaisantes (AFNOR).

Vérification Ve : La vérification est la confirmation par des preuves tangibles que les exigences spécifiées ont été satisfaites [Faisandier2012] [ISO900020002005].

Les attributs Fa et Ve ont chacun trois états possibles :

- UD, pour *indéterminé* et valeur par défaut, indiquant que la faisabilité ou la vérification de l'entité n'est pas encore réalisée ou terminée.
- OK, pour *faisable* ou *validé*, indiquant respectivement, que l'entité étudiée est à priori réalisable au regard de ses objectifs et contraintes, et que l'entité est terminée et respecte parfaitement ses objectifs et contraintes initiaux.
- KO, pour *infaisable* ou *non-validé*, indiquant respectivement, que l'entité étudiée n'est à priori pas réalisable au regard de ses objectifs et contraintes, et que l'entité est terminée et ne respecte pas parfaitement ses objectifs et contraintes initiaux.

Nous associons aux entités du système, ensemble des besoins et des exigences SR et alternative de solution système SA , et aux entités du projet, tâche de recueil des besoins et des exigences PR et tâche de développement d'alternative PA , l'attribut d'état Fa , et aux entités SA , PR , PA , l'attribut Ve . Les exigences du système SR ne dispose pas de l'attribut de vérification Ve , car l'analyse de faisabilité, garantit déjà que les exigences sont cohérentes et non contradictoires. Nous ne considérons pas, dans nos propositions, d'attributs d'états au niveau du système S et du projet P car ceux-ci agrègent les états de l'ensemble des sous-systèmes et des sous-projets et ne permettent donc pas de détecter, dès son apparition, l'occurrence d'un problème.

Sept règles de synchronisation entre les deux processus, sur un seul niveau de décomposition sont définies. Elles se basent sur les attributs d'états, comme illustré en figure 5.11 :

- Deux règles de précédence $r1$ et $r3$ qui indiquent qu'une entité X , appartenant au système SR et SA ou au projet PR et PA ne peut pas être *vérifiée* ou *non-vérifiée* $X.Ve = UD$ si elle n'a pas d'abord été déclarée *faisable*, $X.Fa = OK$.
- Une règle spécifique au projet $r2$ indiquant qu'une tâche de développement PA ne peut pas se terminer et être *vérifiée* $PA.Ve = OK$ ou *non-vérifiée* $PA.Ve = KO$ tant que la tâche de recueil des besoins PR n'est pas elle-même terminée et *vérifiée* $PR.Ve \neq UD$.
- Deux règles de synchronisation orientées du projet au système $cO1$ et $cO2$, qui indiquent que les tâches du projet PR et PA doivent être déclarées *faisable* $Fa = OK$ par le manager avant que les concepteurs puissent commencer à travailler $SR = UD$ et $SA.Fa = UD$.

- Deux règles de synchronisation non orientées $c1$ et $c2$, qui définissent des points de synchronisation dès que l'une des activités des deux processus considérés se termine dans de bonnes conditions (*vérifiée*) $X.Ve = OK$ ou qu'un problème est détecté (*non-vérifié*) $X.Ve = KO$.

Deux règles de synchronisation inter-niveaux de décomposition sont définies, mais ne sont pas détaillées dans ce mémoire. Ces neuf règles sont implémentées dans une maquette logicielle liée au projet ANR ATLAS.

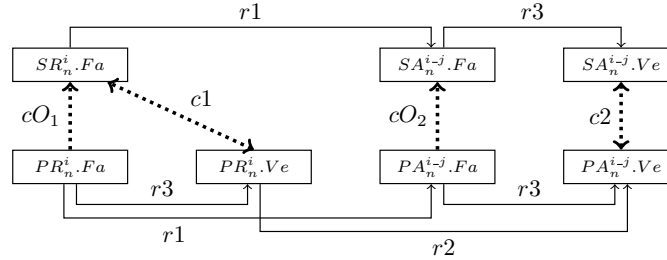


FIGURE 5.11 – Règles de synchronisation

Ces règles autorisent ou interdisent des combinaisons de valeurs des attributs Fa et Ve passant ainsi de 2187 combinaisons possibles (sans aucune règle de synchronisation) à 27 (en tenant compte des sept règles de synchronisation), comme illustrée en figure 5.12.

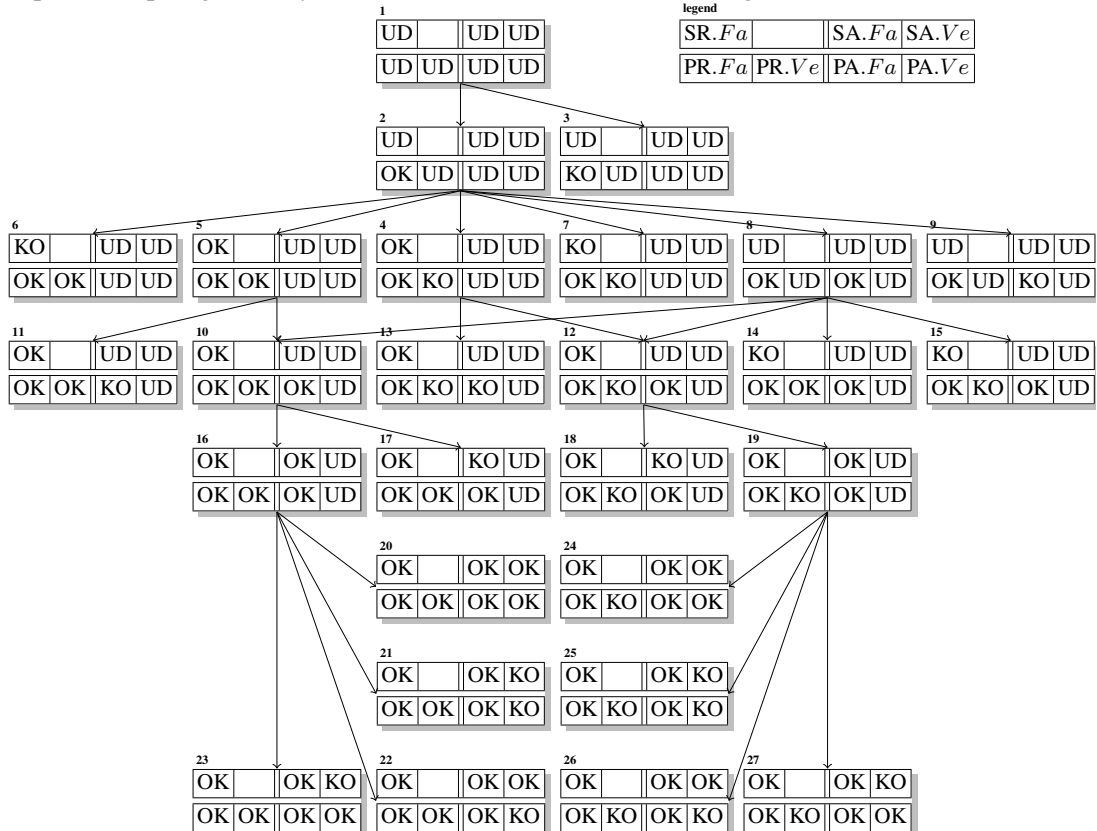


FIGURE 5.12 – Graphe de Synchronisation



A.T.L.A.S. Dans le cadre du projet ANR ATLAS (2007-2011), et plus particulièrement dans les travaux de thèse de M. J. Abeille [Abeille2011], nous avons proposé et défini les neuf règles de synchronisation. Le besoin de couplage et d'interactions entre le processus de conception et celui de réalisation a été conforté par l'interview d'une quinzaine d'ingénieurs et managers, travaillant dans les entreprises associées au pôle de compétitivité *Aerospace Valley*³.

Sur notre panel d'entreprises, 11% sont de toutes petites entreprises ou *TPE*, 22% sont de petite ou moyenne taille *PME*, et 67% sont de grands groupes. Les résultats principaux sont les suivants : (1) toutes les entreprises sont confrontées à ce problème de couplage et de synchronisation mais seuls 18% d'entre elles utilisent des outils spécifiques de collaboration ou de développement de produits, (2) 50% des entreprises prennent des décisions en tenant compte, simultanément, des contraintes de conception et de projet durant des réunions auxquelles participent à la fois, des concepteurs et des managers, et (3) dans 66% des cas, les interactions et la synchronisation entre les processus sont réalisées via des interactions humaines. Même pour les compagnies ayant déployé des outils collaboratifs, utilisant des standards et de procédures (45%), les décisions sont prises en exploitant l'expertise humaine lors de réunion de projet.

Ces travaux ont été valorisés dans [Aldanondo+2010a], [Coudert+2011a], [Vareilles+2015]*.

5.3 Synthèse du chapitre



Cette troisième thématique de recherche porte sur l'extension de la configuration de produits à d'autres objets et processus de l'entreprise. La diversité des produits offertes aux clients engendre une diversité au niveau de tous les processus de l'entreprise : conception, fabrication, maintenance, assemblage, documentation, recyclage ... Le processus de configuration s'étend donc, naturellement, vers ceux-ci. De plus, nous ne pouvons plus considérer les différents processus comme indépendants les uns des autres : ils sont tous étroitement liés et les choix réalisés, au sein d'une activité particulière, ont un impact non négligeable sur l'ensemble des processus l'entreprise.

Par conséquent, nous étendons et couplons la configuration de produits :

- à des processus amont, par la configuration dynamique et hiérarchique du modèle de connaissances, support de la configuration,
- à des processus connexes, par la génération de la documentation relative au produit configuré, simultanément à sa configuration,
- à des processus aval, par la configuration, simultanée ou non, de gamme d'assemblage ou de processus de réalisation,

L'évaluation de la solution n'est donc plus seulement liée au prix de vente des produits, mais inclut, maintenant, d'autres critères, tels que la durée de fabrication ou d'immobilisation, la performance énergétique ou l'intensité de déformation.

Afin de garantir la cohérence des processus de conception et de réalisation, et détecter au plus tôt une déviation dans l'atteinte des objectifs globaux, nous définissons neuf règles de couplage et de synchronisation. Ces règles se basent sur des attributs d'états associés, d'une part, aux entités du système conçu, les besoins et les exigences ainsi que les différentes alternatives de solution, et d'autre part, aux entités du projet, la tâche de recueil des besoins et des exigences, ainsi que la tâche de développement de l'alternative.

3. <http://www.aerospace-valley.com/en/>

Ces travaux ont donné lieu à la publication de 6 articles *WoS** (ICAE 2015, CII 2014, IJPR 2013 (2), EAAI 2012, JIM 2008, IJCIM 2007) et 26 communications avec actes édités.

Nos travaux sur la configuration/conception étendue nous ont conduit (1) à piloter quatre sessions spéciales sur cette thématique : 5th IFIP Advances in Production Management Systems, APMS 2014, intitulée « Design for Lean Manufacturing » en collaboration avec le Dr. M. Nguyen Dang, de l'université *University of Economics and Business*, Hanoi, Vietnam, 14th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing, INCOM 2012, intitulée « Extended Product Design and Product Lifecycle Management » avec le Pr. L. Zhang de l'*University of Groningen* Pays Bas, 9^e Congrès International de Génie Industriel, CIGI2011, intitulée « conception étendue » et 8^e ENIM IFAC Conférence Internationale de Modélisation et Simulation, MOSIM 2010, intitulée « conception étendue » ; (2) à participer aux comités scientifiques des conférences *Product Lifecycle Management PLM*, 2015, *Working Conference on Virtual Enterprises*, Pro-Ve, 2015 et de la session spéciale *EXXPAND*, 8^e Congrès International de Génie Industriel, CIGI, 2008 ; et (3) à participer aux comités d'organisation des conférences *Working Conference on Virtual Enterprises*, Pro-Ve, 2015 et 17th *International Conference Interoperability for enterprises Systems and Applications*, I-ESA, Albi, 2014.

Le travail mené en collaboration avec le Professeur L. Zhang de l'*Univeristy of Groningen*, Pays Bas, en 2012 lors de son séjour de 3 mois dans notre laboratoire, a conforté nos propositions quant à l'association de la configuration de produit et la configuration du processus de réalisation.

L'ensemble de ces travaux nous a conduit à participer à deux jurys de thèse en tant qu'examinatrice : celle de M. Juan Romero Bejarano, *Collaborative Problem Solving Within the Supply Chains : General Framework, Process and Methodology*, soutenue le 03 décembre 2013, [[Romero Bejarano2013](#)], prix Léopold Escande 2014, et celle de M. Aurélien Reyssset, *Conception préliminaire d'actionneurs électromécaniques - outils d'aide à la spécification et à la génération de procédures de dimensionnement pour l'optimisation*, soutenue le 23 janvier 2015, [[Reyssset2015](#)].

Conclusions et Projets de Recherche

6.1 Synthèse des activités de recherche et Contributions

Nos travaux de recherche portent sur la configuration interactive étendue à base de contraintes. En effet, la configuration ne porte plus seulement sur le processus de définition de produits mais sur l'ensemble des processus de l'entreprise (en amont et en aval). Nos travaux couvrent, de plus, la totalité du processus de configuration, de la formalisation des connaissances sous forme de contraintes à leur exploitation, comme illustré sur la partie gauche de la figure 6.1. Sur cette dernière décennie, quatre projets de recherche nous ont permis de confronter nos propositions à des problématiques industrielles réelles, comme illustré sur la partie droite de la figure 6.1.

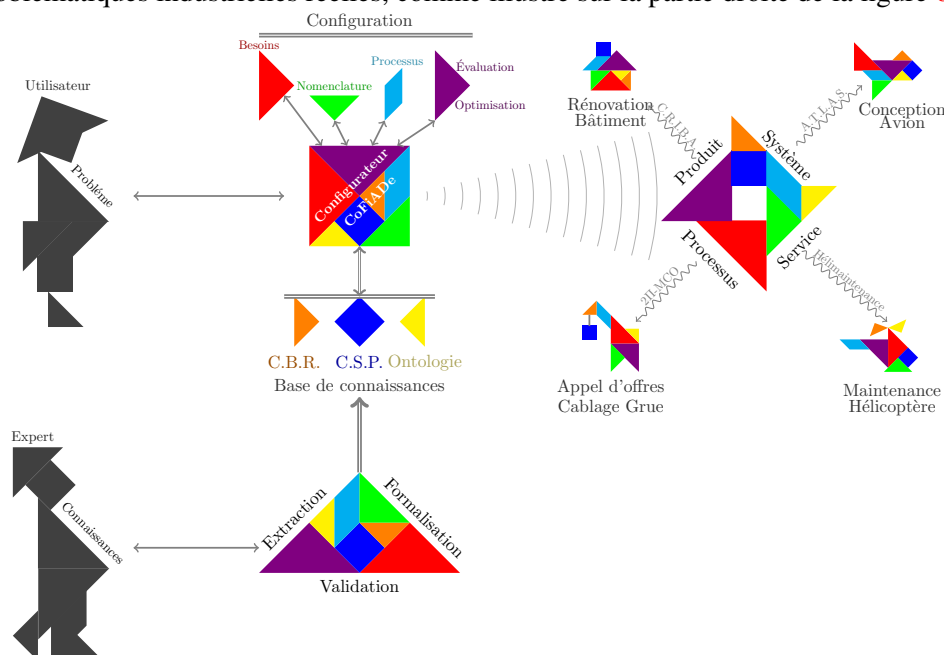


FIGURE 6.1 – Thématiques de recherche et applications industrielles
Trois thématiques de recherche étayent nos contributions :

[T1] Thématique 1 : Formalisation des Connaissances et Contraintes.



Cette thématique de recherche fait l'objet du chapitre 3 de ce mémoire. Elle concerne la formalisation, sous la forme de *CSP*, des connaissances nécessaires à la constitution des modèles génériques, cœur de la configuration. Plusieurs types de connaissances sont pris en compte dans nos travaux : les connaissances générales, valides dans un grand nombre de situations, et les connaissances contextuelles, pertinentes uniquement dans un nombre plus restreint de situations spécifiques. Les connaissances générales recouvrent des connaissances formelles, métier ou empiriques. Elles restent stables dans le temps, sont déjà ou peuvent être rendues explicites, via des interviews d'experts par exemple, et peuvent être formalisées comme un *CSP*. Leur diversité (liste de valeurs autorisées, formules mathématiques, abaque, activation d'éléments) nous conduit à assembler dans un seul modèle générique, différents types de *CSP* : *CSP* discrets, continus, temporels, mixtes, conditionnels. Ces connaissances peuvent être structurées à l'aide d'ontologie afin de faciliter leur réutilisation et leur maintenance.

Les connaissances contextuelles sont beaucoup moins stables dans le temps que les connaissances générales. Elles sont donc plus difficiles à formaliser comme un *CSP*, car une mise à jour régulière est nécessaire afin de garantir leur validité dans un contexte changeant. Ces connaissances sont formalisées par des cas, regroupés dans des bases, exploitables par des approches de type *CBR* ou des algorithmes de *Data-mining*.

Dans nos travaux, nous privilégions l'utilisation des connaissances générales pour leur validité dans un grand nombre de situations et exploitons, au moment opportun dans le processus de configuration, les connaissances contextuelles, afin d'apporter une aide originale et enrichie à l'utilisateur, dans un contexte donné.

Cette thématique de recherche a donné lieu à la définition de deux nouveaux types de contraintes : les contraintes numériques définies par morceaux et les contraintes contextuelles. L'ensemble de nos contributions a été publié dans 5 articles *WoS** (AIEDAM 2014, EAAI 2012, IJPR 2013, EAAI2009, IJCM 2008) et 16 communications avec actes édités.

[T2] Thématique 2 : Exploitation des connaissances et Filtrage.



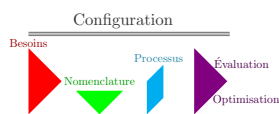
Cette thématique de recherche fait l'objet du chapitre 4 de ce mémoire. Elle concerne l'exploitation des connaissances formalisées sous forme de contraintes, par l'utilisation de plusieurs méthodes de filtrage de faible degré (arc-cohérence, $2B$ -cohérence, τ -AC-3), intégrées à notre solution logicielle CoFiADe. Les connaissances empiriques, formalisées par des contraintes numériques binaires définies par morceaux, sont représentées sous forme d'arbre quaternaire, en exploitant six degrés d'information portés par les différentes zones de l'espace des solutions, et en propageant celles-ci des zones informées aux zones non avisées de leur cohérence.

Afin de fournir aux utilisateurs des recommandations quant aux choix de valeurs possibles, nous enrichissons le *CSP* par des connaissances contextuelles. Les contraintes contextuelles sont paramétrées à partir de cas pertinents et similaires dans un contexte de conception donné, identifiés par un *CBR*, et complétées par la fréquence d'occurrence des valeurs possibles du domaine, par une méthode prédictive issue du *Data-mining*. L'utilisateur a ainsi une visualisation dynamique du profil d'utilisation des valeurs de certaines variables clé dans un contexte donné et précisé au fil de la résolution.

La présentation de solutions Pareto-optimales à l'utilisateur peut lui permettre de prendre la meilleure décision, celle présentant un bon compromis entre plusieurs critères antagonistes (coût et délai, par exemple). Pour ce faire, nous intégrons les *CSP* à structure statique dans un algorithme évolutionnaire *SPEA2*, afin de trouver, en un temps raisonnable, des solutions caractérisant bien l'ensemble des solutions Pareto-optimales. Les méthode de filtrage des contraintes sont utilisées dans les phases donnant naissance à de nouveaux individus (génération, croisement, mutation) afin de garantir leur cohérence avec le modèle de connaissances.

Les résultats de cette thématique de recherche ont été publiés dans 5 articles *WoS** (CII 2014, IJPR 2013, EAAI 2012, EAAI 2009, IJCIM 2008) et 13 communications avec actes édités.

[T3] Thématique 3 : Configuration interactive et Extensions.



Cette thématique fait l'objet du chapitre 5 de ce mémoire. Elle étend nos propositions de la configuration à d'autres processus de l'entreprise afin de gérer au mieux leur diversité et répondre au besoin de diminution des cycles de conception tout en préservant la qualité des

systèmes conçus. Avec la tendance actuelle de personnalisation ou *customization* des produits, les entreprises se trouvent confrontées à une diversité grandissante au niveau de l'ensemble de leurs activités et processus. Afin de garantir aux clients une qualité et un service irréprochables, la diversité doit être gérée de manière globale et cohérente : l'ensemble du cycle de vie des produits (conception, fabrication, recyclage, documentation) est donc concernée. L'évaluation des solutions ne peut donc plus être mono-critère et associée à un seul processus (prix de vente, par exemple), mais multi-critère et pluri-processus (performance, empreinte carbone, délai d'obtention ...).

Nos travaux étendent et couplent la configuration de produits à des processus amont, création du modèle générique et processus de réponse à appel d'offres, aval, processus de réalisation, d'assemblage et de maintenance, et connexes, la génération de la documentation.

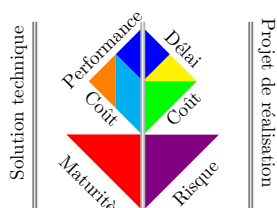
Afin de garantir l'atteinte des objectifs globaux (exigences client, contraintes de fabrication ...), nous proposons sept règles de synchronisation entre processus (sur un même niveau de décomposition) et deux règles inter-niveaux, qui permettent de détecter au plus tôt l'occurrence d'un problème majeur mettant en péril leur bon déroulement et le non respect des objectifs initiaux.

Les résultats de cette thématique de recherche ont été publiés dans 6 articles *WoS** (ICAE 2015, CII 2014, IJPR 2013 (2), EAAI 2012, JIM 2008, IJCIM 2007) et 26 articles avec actes édités.

6.2 Projet de recherche

Les travaux accomplis nous amènent à considérer quatre pistes de recherche. Les deux premières s'inscrivent dans la continuité de nos travaux, et portent, d'une part, sur la prise en compte des risques projet en réponse à appel d'offres et, d'autre part, sur l'utilisation des approches par contraintes en optimisation multi-critère. Les deux autres pistes se concentrent, quant à elles, sur deux aspects clé de la configuration interactive : la dynamique du modèle de connaissances et l'interaction avec l'utilisateur.

6.2.1 Configuration, PRAO et Risques



La recrudescence des appels d'offres et la compétition exacerbée des marchés font émerger le besoin, pour les entreprises soumissionnaires, de rationaliser le processus de réponse à appel d'offres en estimant mieux les offres résultantes et les risques encourus. Nous souhaitons proposer, à ces entreprises, une méthodologie et un outil d'aide à la décision supportant leur processus de réponse à appel d'offres. Nos propositions leur permettraient de concevoir et définir différentes offres et de les évaluer sur des critères originaux associant aux coûts, délais, performance traditionnellement considérés, une maturité système et un risque projet.

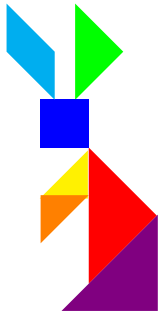
Premièrement, de manière identique au projet ANR ATLAS (2008-2011), nous souhaitons construire simultanément et de manière descendante, la nomenclature du système (ou produit) répondant au cahier des charges de l'appel et la structure du projet de réalisation permettant son développement. Cette pré-conception des offres composées d'un couple (solution technique, projet de réalisation) reposerait sur des ontologies système et projet, enrichies par des concepts liés au risque projet [Gourc2006], [Marmier2014]. Ce concept de risque projet peut se spécialiser en risques projet endogènes liés au projet ou à la stratégie de l'entreprise et en risques projet exogènes, liés au client et à l'environnement [Gourc2006], [Botero+2013], [Marmier2014]. Les risques projet considérés sont caractérisés par une fréquence d'occurrence, des impacts sur les tâches du projet (financiers ou temporels) et sur l'occurrence d'autres risques (fréquence d'occurrence), ainsi que sur leurs stratégies de traitement préventives ou curatives [Marmier+2013]. À chaque concept risque projet de l'ontologie et de manière identique aux travaux présentés en sous-section 3.2.2, nous pouvons associer un CSP permettant de prendre en compte les risques projet dans le processus de configuration afin d'évaluer les solutions sur des critères pluri-processus et couvrant six indicateurs liés au produit (coût, performance et maturité) et projet (coût, durée et risque). L'utilisation de méthodes de filtrage des CSP permettra de répercuter un choix système (choix d'un composant), projet (choix d'un fournisseur) ou risque (choix d'une stratégie de traitement) sur l'ensemble de l'offre en cours de construction, d'évaluer celle-ci sur les six indicateurs retenus et de qualifier son potentiel pour le client (solution technique de l'offre pertinente) et l'entreprise soumissionnaire (projet de réalisation maîtrisé).

Deuxièmement, l'activité de définition de la solution technique peut n'être que très partiellement réalisée, se limitant à des choix de principe par exemple, au moment de la réponse, laissant ainsi une part importante d'incertitudes (coûts et délais incertains, maturité des composants faible ou incertaine par exemple). L'évaluation, la quantification et l'exploitation de ces incertitudes sont nécessaires afin de permettre au décideur de disposer d'un bon niveau de confiance dans l'offre proposée. L'incertitude, quant à la rentabilité d'une offre, pourrait être ainsi réduite par la prise en compte d'expériences passées capitalisées.

Ces travaux feront l'objet du travail de thèse de M. Abdourahim Sylla, intitulée *Aide à la décision en réponse à appel d'offres : une approche intégrée de conception conjointe produit-processus, de gestion des risques et de retour d'expérience*, en collaboration avec l'École Nationale de Tarbes et plus particulièrement, le Professeur L. Geneste et le maître de conférences, HdR, T. Coudert, qui débutera à l'automne 2015. Une collaboration avec le Docteur K. Kirytopoulos¹ de l'*University of South Australia*, Adélaïde, Australie, est envisagée en 2016 pour valider nos propositions sur la prise en compte des risques projet lors du processus de réponse à appel d'offres.

1. <http://kkir.simor.ntua.gr/>

6.2.2 Filtrage et Algorithmes Évolutionnaires



L'utilisation des approches par contraintes en optimisation multi-critère semble prometteuse, tel que présenté en sous-section 4.2.4. Le maintien de la cohérence des individus lors de leur génération et reproduction semble une bonne stratégie pour converger rapidement vers les solutions Pareto-optimales. Dans nos travaux, nous avons comparé nos propositions avec des algorithmes de *Branch-and-Bound* [Pitiot+2014] et avons montré les limites de ces derniers en termes de taille de modèle et de temps de convergence.

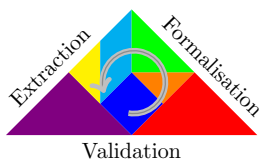
Nous devons maintenant renforcer nos propositions par la comparaison de notre approche avec d'autres méthodes d'optimisation, les algorithmes *EA* utilisant les fonctions de pénalités par exemple, par une campagne de tests approfondie sur différents types de problèmes de configuration. Les différents problèmes de configuration seront typés à partir du nombre de variables \mathbb{V} incluses dans leur modèle générique, du nombre de valeurs présentes dans leur domaine \mathbb{D} et de la densité de contraintes \mathbb{C} présentes dans le modèle (beaucoup de variables reliées entre elles par des contraintes ou très peu).

Actuellement, nos propositions ont été testées et validées sur des problèmes d'optimisation présentant uniquement deux critères à optimiser : le coût de la solution ($\text{Coût}_{\text{Composants}}$ et $\text{Coût}_{\text{Activites}}$) et le délai d'obtention ($T.pdt$). Or comme présenté en sous-section 5.2.1, le besoin d'évaluation des solutions porte souvent sur de nombreux critères, parfois antagonistes. Nos propositions doivent donc être testées, et éventuellement adaptées, à des problèmes de configuration présentant plus de deux critères. Les travaux de thèse portant sur la configuration de processus de réponse à appel d'offres, présentés en section 6.2.1, pourront être exploités afin de tester nos propositions sur un problème présentant six critères d'évaluation : coûts composants, coûts activités, délais, performance, maturité système et risque projet.

Une méthodologie permettant de paramétrer l'algorithme d'optimisation en fonction du type de problème à optimiser (nombre de variables, densité des contraintes ...) doit, de même, être définie. En effet, cinq paramètres influent sur le comportement et la convergence de l'algorithme SPEA2 : la taille de la population initiale, celle de la population intermédiaire ou *mating pool*, le nombre maximal de générations engendrées ainsi que les probabilités de croisement pc et de mutation pm des opérateurs d'engendrement de la nouvelle génération, cf. sous-section 4.2.4. Leur initialisation est importante car elle conditionne la rapidité de convergence et la couverture de l'espace des solutions de l'algorithme.

Ces travaux font l'objet du travail de thèse de Luis Ignacio Garcés Monge, débutée en juillet 2015, portant sur l'*Optimisation évolutionnaires sous contraintes : typologie de problèmes et méta-heuristiques*, en collaboration avec le maître de conférences, P. Pitiot, de l'*École d'Ingénieurs 3IL*, chercheur associé à notre laboratoire.

6.2.3 Dynamique des Modèles de Connaissances



Le modèle générique est un concept clé en configuration car il engage et définit la diversité proposée à l'utilisateur : il représente l'ensemble des options et variantes d'un produit incluant leurs compatibilités et/ou incompatibilités.

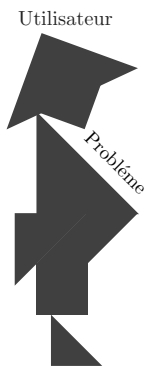
Premièrement, la validation du modèle générique est donc fondamentale car c'est le raisonnement réalisé sur celui-ci qui permet à l'utilisateur de faire de bons ou meilleurs choix. Deux cas de figure peuvent se présenter : (1) le modèle peut contenir des incohérences qu'il faut détecter et corriger [Bakker+1993] [Felfernig+2012], et (2) il est susceptible de contenir des contraintes redondantes qu'il faut éliminer pour ne conserver qu'un ensemble minimal de contraintes, représentant l'espace des solutions à maintenir [Sabin+1999], [Piette2008]. La validation d'un modèle générique peut être réalisée par sa confrontation avec un ensemble de configurations valides ou erronées stockées dans des bases de cas [Felfernig+2009], [Felfernig+2015]. Il faut alors identifier l'ensemble des contraintes qui ne respectent pas les configurations valides (cas positifs) mais respectent les configurations erronées (cas négatifs). Pour monter en compétences sur la validation de modèles génériques, un séjour de 2 semaines à la faculté des sciences d'Helsinki, dans le groupe de recherche *Product Requirements and Architecture* avec le docteur J. Tiihonen² est envisagé en fin d'année. La redondance des contraintes est, quant à elle, moins critique car elle ne conduit pas l'utilisateur vers des non-solutions, mais leur retrait est utile à la maintenance des modèles génériques.

Deuxièmement, il est important de souligner que la diversité (liées aux besoins, solutions, processus) évolue sans cesse du fait de nouvelles attentes et de nouvelles technologies. Par conséquent, le modèle générique doit être mis à jour avec ces nouvelles connaissances. Une représentation du modèle générique, par exemple sous forme de diagramme *UML* ou *Unified Modeling Language* avant et après son implémentation sous forme de *CSP*, peut aider grandement le dialogue entre l'ensemble des experts impliqués dans la constitution du modèle générique [Felfernig+2000], [Bonev2015]. Mais cette visualisation du modèle générique à base de diagrammes de classes, attributs et méthodes, implique d'une part, que les experts connaissent *UML* (ce qui est très probablement le cas pour les concepteurs et beaucoup moins vrai, pour les autres métiers de l'entreprise, comme les managers, les producteurs, ...) et, d'autre part, qu'une traduction du modèle de classes soit réalisée pour aboutir à un *CSP* cohérent contenant des variables, des domaines et des contraintes de compatibilité et d'activation. Dans les travaux de [Hvam+2014], une extension des diagrammes de classes *UML* est définie et intégrée au progiciel suédois Tacton³, afin de modéliser la structure de familles de produits et la traduire automatiquement sous forme de *CSP* hiérarchique et mixte. De manière similaire aux travaux menés par le Professeur L. Hvam, nous aimerions nous focaliser sur la reconstruction du modèle générique à partir d'un *CSP* et en vérifier son exactitude (les ensembles de solutions des deux modèles doivent être identiques en tout point) et sa minimalité (limiter le nombre de contraintes redondantes). Cette reconstruction permettra ainsi de mieux communiquer sur le modèle générique avec l'ensemble des métiers de l'entreprise impliqués et ainsi de le maintenir et le faire évoluer facilement et rapidement.

2. <http://www.cs.helsinki.fi/u/jutiihon/>

3. <http://www.tacton.com/>

6.2.4 Configuration interactive et Utilisateur



L'exploitation des connaissances en configuration interactive conduit l'utilisateur à voir l'espace des solutions se réduire au fil de ses choix. En considérant le point de vue « utilisateur », il est important de lui permettre de comprendre pourquoi (et comment) l'espace des solutions admissibles est ainsi réduit [Junker2004], [Sinz+2007], de remettre en cause certains de ses choix et d'exprimer des préférences de manière explicite lors de la résolution du CSP, cf. 2.4.

Premièrement, l'utilisateur d'un configurateur a besoin de comprendre comment il est arrivé à cet ensemble de solutions ou pourquoi il n'arrive pas à trouver une solution le satisfaisant [Amilhastre+2002a], [Junker2004], [Haag+2006], [Falkner+2011], [Zhang2014]. Un marquage des valeurs devenues incohérentes avec le problème courant, pourrait fournir à l'utilisateur un certain nombre d'explications quant à leurs retraits, chaque valeur devenue incohérente étant associée à la liste des contraintes ayant conduit à sa suppression, [Ouis+2003], [Prudhomme+2014]. Cette notion d'explications doit être considérée dans nos travaux afin de faciliter la compréhension par l'utilisateur, des impacts de ses choix sur l'espace des solutions et ainsi l'aider dans sa prise de décision par l'identification des causes du retrait de certains valeurs désirées.

Deuxièmement, un utilisateur peut souhaiter modifier ou annuler une ou plusieurs de ses exigences en cours de configuration, et particulièrement si l'espace des solutions courant ne le satisfait pas. Le configurateur doit, d'une part, lui permettre de visualiser et sélectionner les exigences à supprimer ou annuler et, d'autre part, prendre en compte leur suppression pour déterminer le nouvel espace des solutions, contenant potentiellement les solutions recherchées. Afin d'éviter de repartir, à chaque annulation de choix, d'une configuration vierge à laquelle sont ajoutées une à une les exigences conservées, nous souhaitons étudier, analyser et tester les méthodes de relaxation de contraintes pour dépropager les choix remis en question par l'utilisateur [Jussien1997], [Ferguson+2006] et ainsi ramener le problème dans l'état souhaité.

Troisièmement, dans le processus de configuration, l'utilisateur se voit présenter un ensemble de valeurs admissibles pour des variables décrivant son problème. L'ensemble de ces valeurs est équi-préférable, soit positivement, si l'utilisateur en choisit plusieurs pour réduire l'espace des solutions, soit négativement, si l'utilisateur en choisit plusieurs comme indésirables dans sa solution (cf. sous-section 4.2.1). Lorsque l'utilisateur a exprimé l'ensemble de ses besoins et exigences qualifiés de *non-négociables*, il peut souhaiter exprimer des préférences quant aux choix de valeurs restantes et laisser le configurateur résoudre le problème en terminant la configuration [Junker+2003], [Junker2008], [Wang+2013]. Pour ce faire, nous souhaitons adjoindre aux valeurs des variables la notion de préférences afin de guider la recherche vers les bonnes solutions (au regard de l'utilisateur). Cette notion de préférence pourrait aussi être exploitée lors de l'optimisation des solutions par SPEA2 afin de converger vers les zones de solutions Pareto-optimales souhaitées.

PARTIE **IV**

Bibliographie générale

Bibliographie

- [Aamodt+1994] A. AAMODT et E. PLAZA. « Case-based reasoning ; Foundational issues, methodological variations, and system approaches ». In : *AI COMMUNICATIONS* 7.1 (1994), p. 39–59 (cf. p. 46, 56).
- [Abeille+2010] J. ABEILLE, T. COUDERT, E. VAREILLES, L. GENESTE, M. ALDANONDO et T. ROUX. « Formalization of an Integrated System/Project Design Framework: First Models and Processes ». English. In : *Complex Systems Design & Management*. Sous la dir. de Marc AIGUIER, Francis BRETAUDEAU et Daniel KROB. Springer Berlin Heidelberg, 2010, p. 207–217 (cf. p. 43, 45, 71).
- [Abeille2011] J. ABEILLE. « Vers un couplage des processus de conception de systèmes et de planification de projets : formalisation de connaissances méthodologiques et de connaissances métier ». Thèse de doct. Université de Toulouse, 2011 (cf. p. 25, 42, 44, 54, 70, 73, 77).
- [AFNOR1988] AFNOR. *Recommandations pour obtenir et assurer la qualité en conception. Norme X50-127*. AFNOR. 1988 (cf. p. 30).
- [Agrawal+1993] R. AGRAWAL, T. IMIELINSKI et A. SWAMI. « Mining Association Rules Between Sets of Items in Large Databases ». In : *SIGMOD Rec.* 22.2 (juin 1993), p. 207–216 (cf. p. 57).
- [Aldanondo+2005a] M. ALDANONDO, E. VAREILLES, K. HADJ-HAMOU et P. GABORIT. « Aiding design with constraints : an extension of Quad Tree dealing with piecewise functions ». In : *International Conference on Industrial Engineering and Systems Management IESM 2005*. Marrakech, Maroc, mai 2005 (cf. p. 56).
- [Aldanondo+2005b] M. ALDANONDO, E. VAREILLES, P. LAMESLE et K. HADJ-HAMOU. « Modélisation et exploitation des connaissances en Design for X : une application en traitement thermique ». In : *Congrès International de Génie Industriel*. Besançon France, juin 2005 (cf. p. 42).
- [Aldanondo+2006a] M. ALDANONDO, E. VAREILLES, K. HADJ-HAMOU et P. GABORIT. « A constraint based approach for aiding heat treatment operation design and distortion evaluation ». In : *INTERNATIONAL FEDERATION FOR INFORMATION PROCESSING, Artificial Intelligence, Applications and Innovations (AIAI 2006)*. T. 204. Athens, Greece, juin 2006, p. 254–261 (cf. p. 42).
- [Aldanondo+2006b] M. ALDANONDO, E. VAREILLES, K. HADJ-HAMOU et P. GABORIT. « A constraint based approach for aiding heat treatment operation design and distortion evaluation ». English. In : *Artificial Intelligence Applications and Innovations*. Sous la dir. d’Ilias MAGLOGIANNIS, Kostas KARPOUZIS et Max BRAMER. T. 204. IFIP International Federation for Information Processing. Springer US, 2006, p. 254–261 (cf. p. 42, 67).

- [Aldanondo+2006c] M. ALDANONDO, E. VAREILLES, K. HADJ-HAMOU et G. MOYNARD. « Une approche pour la configuration cohérente de produit et de gamme de production ». In : *6th International Conference of Modeling and Simulation, MOSIM 2006*. Rabat, Maroc, avr. 2006, p. 508–516 (cf. p. 72).
- [Aldanondo+2006d] M. ALDANONDO, E. VAREILLES, P. LAMESLE, K. HADJ-HAMOU et P. GABORIT. « Une approche par contraintes du Design for X : une application en traitement thermique ». In : Hermès, 2006. Chap. 8 (cf. p. 42, 56, 67).
- [Aldanondo+2007a] M. ALDANONDO, E. VAREILLES, C. BARON, Y. LAHMAR et L. GENESTE. « Product development and project management ; towards a constraint based approach for co-operation ». In : *International Conference on Industrial Engineering and Systems Management IESM 2007*. Beijing, Chine, mai 2007 (cf. p. 74).
- [Aldanondo+2007b] M. ALDANONDO, E. VAREILLES, Y. LAHMAR, C. BARON et G. MOYNARD. « Une approche pour la configuration cohérente de produit et de gamme de production ». In : *Journal Européen des Systèmes Automatisés* 51.5 (2007), p. 567–584 (cf. p. 74).
- [Aldanondo+2008a] M. ALDANONDO et E. VAREILLES. « Configuration for mass customization: how to extend product configuration towards requirements and process configuration ». English. In : *Journal of Intelligent Manufacturing* 19.5 (2008). WoS*, p. 521–535 (cf. p. 72).
- [Aldanondo+2008b] M. ALDANONDO, E. VAREILLES, K. HADJ-HAMOU et P. GABORIT. « Aiding design with constraints: an extension of quad trees in order to deal with piecewise functions ». In : *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* 21.4 (2008). WoS*, p. 353–365 (cf. p. 46, 56).
- [Aldanondo+2009] M. ALDANONDO, E. VAREILLES, M. DJEFEL, P. GABORIT et J. ABEILLE. « Coupling product configuration and process planning with constraints ». In : *INCOM 2009 & IFAC 2009 - 13th IFAC Symposium on information control problems in manufacturing*. Moscow, RUSSIA, juin 2009, p. 63–68 (cf. p. 74).
- [Aldanondo+2010a] M. ALDANONDO, E. VAREILLES, J. ABEILLE, T. COUDERT et L. GENESTE. « System design and design planning : an interaction identification ». In : *8th International Conference of Modeling and Simulation, MOSIM 2010*. Hammamet Tunisia, mai 2010, p. 740–747 (cf. p. 77).
- [Aldanondo+2010b] M. ALDANONDO, E. VAREILLES et M. DJEFEL. « Towards an association of product configuration with production planning ». In : *International Journal of Mass Customisation* 3.4 (2010), p. 316–332 (cf. p. 74).
- [Aldanondo+2014] M. ALDANONDO, A.F. BARCO-SANTA, E. VAREILLES, M. FALCON, P. GABORIT et L. ZHANG. « Towards a BIM Approach for a High Performance Renovation of Apartment Buildings ». In : *Product Lifecycle Management for a Global Market - 11th IFIP WG 5.1 International Conference, PLM 2014, Yokohama, Japan, July 7-9, 2014, Revised Selected Papers*. 2014, p. 21–30 (cf. p. 70, 73).
- [Allen1983] J.F. ALLEN. « Maintaining knowledge about temporal intervals ». In : *ACM* 11 (1983), p. 123–154 (cf. p. 40).
- [Amilhastre+2002a] J. AMILHASTRE, H. FARGIER et P. MARQUIS. « Consistency restoration and explanations in dynamic CSPs Application to configuration ». In : *Artificial Intelligence* 135.1 2 (2002), p. 199–234 (cf. p. 85).
- [Amilhastre+2002b] J. AMILHASTRE, H. FARGIER et P. MARQUIS. « Consistency restoration and explanations in dynamics CSPs- Application to configuration ». In : *Artificial Intelligence* 135.1-2 (2002), p. 199–234 (cf. p. 58).

-
- [Amilhastre+2014] J. AMILHASTRE, H. FARGIER, A. NIVEAU et C. PRALET. « Compiling CSPs : A Complexity Map of (Non-Deterministic) Multivalued Decision Diagrams ». In : *International Journal on Artificial Intelligence Tools* 23.4 (2014) (cf. p. 53).
- [Amilhastre1999] J. AMILHASTRE. « Représentation par automate d'ensemble de solutions de problèmes de satisfaction de contraintes ». Thèse de doct. Université de Montpellier, 1999 (cf. p. 41).
- [Anderson+1996] D. ANDERSON et B.J. PINE. *Agile Product Development for Mass Customization*. McGraw-Hill, 1996 (cf. p. 30, 64).
- [Avramenko+2006] Yuri AVRAMENKO et Andrzej KRASLAWSKI. « Similarity concept for case-based design in process engineering. » In : *Computers & Chemical Engineering* 30.3 (2006), p. 548–557 (cf. p. 57).
- [Bakker+1993] R. R. BAKKER, F. DIKKER, F. TEMPELMAN et P.M. WOGNUM. « Diagnosing and Solving Over-Determined Constraint Satisfaction Problems ». In : *Proceedings of IJCAI-93*. Morgan Kaufmann, 1993, p. 276–281 (cf. p. 84).
- [Barco Santa+2014a] A. F. BARCO SANTA, E. VAREILLES, M. ALDANONDO et P. GABORIT. « A Recursive Algorithm for Building Renovation in Smart Cities ». English. In : *Foundations of Intelligent Systems*. Sous la dir. de Troels ANDREASEN, Henning CHRISTIANSEN, Juan-Carlos CUBERO et Zbigniew W. RA. T. 8502. Lecture Notes in Computer Science. Springer International Publishing, 2014, p. 144–153 (cf. p. 43, 69, 70, 73).
- [Barco Santa+2014b] A. F. BARCO SANTA, E. VAREILLES, M. ALDANONDO, P. GABORIT et M. FALCON. « Constraint-based Decision Support System : Designing and Manufacturing Building Facades ». In : *oint Conference on Mechanical, Design Engineering & Advanced Manufacturing, JCM 2014*. Toulouse, France : Proceedings to appear with Springer, juin 2014 (cf. p. 43, 73).
- [Barco Santa+2015] A.F. BARCO SANTA, J.G. FAGES, E. VAREILLES, M. ALDANONDO et P. GABORIT. « Open Packing for Facade-Layout Synthesis Under a General Purpose Solver ». In : *21st International Conference on Principles and Practice of Constraint Programming (CP 2015)*. 2015 (cf. p. 69).
- [Barco+2015] A.F. BARCO, E. VAREILLES, M. ALDANONDO et P. GABORIT. « Layout Synthesis for Symmetrical Facades : Constraint-Based Support for Architects Decision-Making ». In : *Artificial Intelligence Applications and Innovations*. Sept. 2015 (cf. p. 43).
- [Baron+2006] C. BARON, M. ZOLGHADRI, D. ESTÈVE, L. GENESTE, M. ALDANONDO et E. VAREILLES. « Product and Project Co-design : what do system engineering standards recommend ? » In : *Virtual Concept*. Sous la dir. de SPRINGER. T. 2. 2-287-48663-2. 9. Playa Del Carmen, Mexico : Xavier Fischer and Daniel Coutellier, nov. 2006, p. 36 (cf. p. 74).
- [Benaben2009] A.-L. BENABEN. « Méthodologie d'identification et d'évaluation de la sûreté de fonctionnement en phase de réponse à appel d'offre ». Thèse de doct. Laboratoire Génie de Production - LGP (Tarbes, France), juin 2009 (cf. p. 72).
- [Benhamou+1994] F. BENHAMOU, D. MC ALLESTER et P. VAN HENTENRYCK. « Clp(intervals) revisited ». In : *ILPS'94*. 1994, p. 1–21 (cf. p. 52).
- [Benhamou1996] F. BENHAMOU. « Heterogeneous constraint programming ». In : *5th international conference on algebraic and logic programming*. Sous la dir. de Springer VERLAG. Aachen, Allemagne, mar. 1996, p. 62–76 (cf. p. 52).

- [Bergmann2002] R. BERGMANN. *Experience Management: Foundations, Development Methodology, and Internet-Based Applications*. T. 2432. LNAI. Lecture Notes in Artificial Intelligence. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2002 (cf. p. 57).
- [Bessière+1993] C. BESSIÈRE et M. CORDIER. « Arc-consistency and arc-consistency again ». In : AAAI. Cambridge MA, 1993, p. 108–113 (cf. p. 52).
- [Bessière+1994] C. BESSIÈRE et J. RÉGIN. « An arc-consistency algorithm optimal in the number of constraint checks ». In : *ECAI Workshop on Constraint Processing*. 1994 (cf. p. 52).
- [Bessiere+2013] C. BESSIERE, H. FARGIER et C. LECOUTRE. « Global Inverse Consistency for Interactive Constraint Satisfaction ». English. In : *Principles and Practice of Constraint Programming*. Sous la dir. de Christian SCHULTE. T. 8124. Lecture Notes in Computer Science. Springer Berlin Heidelberg, 2013, p. 159–174 (cf. p. 53).
- [Beyer2001] H.G. BEYER. *The theory of Evolution Strategies*. Natural Computing Series. Springer, 2001 (cf. p. 59).
- [Bonev2015] M. BONEV. « Enabling Mass Customization in Engineer-To-Order Industries ». Thèse de doct. DTU Management Engineering, 2015 (cf. p. 84).
- [Botero Lopez2014] J. L. BOTERO LOPEZ. « Gestion des risques par retour d’expérience dans le processus de réponse à appel d’offres ». Thèse de doct. Laboratoire Génie de Production - LGP (Tarbes, France), nov. 2014 (cf. p. 72).
- [Botero+2013] J.D. BOTERO, C. BÉLER et D. NOYES. « Risk analysis in project early phase taking into account the product lifecycle : Towards a generic risk typology for bidding process ». In : *7th IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management, and Control, 2013*. Thanks to International Federation of Automatic Control (IFAC) editor. The original PDF of the article can be found at : <http://www.ifac-papersonline.net/Detailed/59977.html>. Saint Petersburg, RU, juin 2013, pp. 495–500 (cf. p. 82).
- [Brézillon2007] P. BRÉZILLON. « Context Modeling : Task Model and Practice Model. » In : *CONTEXT*. Sous la dir. de B. N. KOKINOV, D. C. RICHARDSON, T. ROTH-BERGHOFER et L. VIEU. T. 4635. Lecture Notes in Computer Science. Springer, 4 sept. 2007, p. 122–135 (cf. p. 46).
- [Briggs+1991] J. BRIGGS et D. PEAT. *Un miroir turbulent - Guide illustré de la théorie du chaos*. traduit de l’américain par D. Stoquart. Harper et Row publishers, 1991 (cf. p. 55).
- [Brin+1997] Sergey BRIN, Rajeev MOTWANI et Craig SILVERSTEIN. « Beyond Market Baskets: Generalizing Association Rules to Correlations ». In : *SIGMOD Rec.* 26.2 (juin 1997), p. 265–276 (cf. p. 47).
- [Brown+1989] D.C. BROWN et B. CHANDRASEKARAN. « Design Problem Solving - Knowledge Structures and Control Strategies. » In : *Research Notes in Artificial intelligence Series*. Sous la dir. de Pitman PUBLISHING. London, 1989 (cf. p. 29, 30).
- [Campagna+2013] D. CAMPAGNA et A. FORMISANO. « Product and Production Process Modeling and Configuration ». In : *Fundam. Inf.* 124.4 (oct. 2013), p. 403–425 (cf. p. 65, 66, 75).
- [Chalal+2006] R CHALAL et AR GHOMARI. « An approach for a bidding process knowledge capitalization ». In : *Proceedings of world academy of science, Engineering and technology* 13 (2006) (cf. p. 72).

-
- [Chenouard2007] R. CHENOUARD. « Résolution par satisfaction de contraintes appliquée à l'aide à la décision en conception architecturale ». Thèse de doct. ENSAM, 2007 (cf. p. 39, 45).
- [Codet de Boisse+2010] A. CODET DE BOISSE, E. VAREILLES et M. GABORIT P. and Aldanondo. « Couplage CSP et CBR : premières identifications des modes de couplage ». In : *8th International Conference of Modeling and Simulation, MOSIM 2010*. Hammamet Tunisia, mai 2010, p. 740–747 (cf. p. 48, 58, 69).
- [Codet de Boisse2013] A. CODET DE BOISSE. « Aide à la décision exploitant de la connaissance générale et contextuelle : application à la maintenance d hélicoptères. » Thèse de doct. Université de Toulouse, 2013 (cf. p. 25, 43, 47, 54, 57, 58, 68).
- [Coello Coello2002] C. COELLO COELLO. « Theoretical and numeric constraint-handling techniques used with EAs : a survey of the state of art ». In : *Computer methods in Applied Mechanics and Engineering* 191.11-12 (2002), p. 1245–1287 (cf. p. 59).
- [Coudert+2011a] T. COUDERT, E. VAREILLES, M. ALDANONDO, L. GENESTE et J. ABEILLE. « Synchronization of system design and project planning : Integrated model and rules ». In : *Software, Knowledge Information, Industrial Management and Applications (SKIMA), 2011 5th International Conference on*. Sept. 2011, p. 1–6 (cf. p. 45, 77).
- [Coudert+2011b] T. COUDERT, E. VAREILLES, L. GENESTE, M. ALDANONDO et J. ABEILLE. « Proposal for an Integrated Case Based Project Planning ». English. In : *Complex Systems Design & Management*. Sous la dir. d'Omar HAMMAMI, Daniel KROB et Jean-Luc VOIRIN. Springer Berlin Heidelberg, 2011, p. 133–144 (cf. p. 45, 74).
- [Coudert+2012] T. COUDERT, E. VAREILLES, L. GENESTE et M. ALDANONDO. « Improvement of retrieval in case-based reasoning for system design ». In : *Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM), 2012 IEEE International Conference on*. Déc. 2012, p. 1538–1542 (cf. p. 45, 58).
- [Coudert2014] T. COUDERT. *Formalisation et exploitation de connaissances et d'expériences pour l'aide à la décision dans les processus d'ingénierie système*. Oct. 2014 (cf. p. 37).
- [Darlington+2008] M. J. DARLINGTON et S. J. CULLEY. « Investigating ontology development for engineering design support ». In : *Advanced Engineering Informatics* 22.1 (2008), p. 112–134 (cf. p. 44).
- [Dechter+1991] I. DECHTER R. and Meiri et J. PEARL. « Temporal constraint network ». In : *Artificial Intelligence* 49 (1991), p. 61–95 (cf. p. 40).
- [Dhungana+2011] D. DHUNGANA, P. GRUNBACHER et R. RABISER. « The DOPLER meta-tool for decision-oriented variability modeling : a multiple case study ». In : *Automated Software Engineering* 18.1 (2011), p. 77–114 (cf. p. 65).
- [Dieng+1998] R. DIENG et S. HUG. « Comparison of personal ontologies represented through conceptual graphs ». In : *European Conference of Artificial Intelligence*. 1998, p. 341–345 (cf. p. 44).
- [Djefel2010] M. DJEFEL. « Couplage de la configuration de produit et de projet de réalisation : exploitation de saporches par contraintes et des algorithmes évolutionnaires ». Thèse de doct. Université de Toulouse - Mines Albi, 2010 (cf. p. 25, 40, 42, 54, 61, 67, 73).
- [Faisandier2012] A. FAISANDIER. *Systems Architecture and Design*. Enginnering and architecturing multidisciplinary systems. Sinergy'Com, 2012 (cf. p. 75).
- [Falkner+2011] A. FALKNER, A. FELFERNIG et A. HAAG. « Recommendation Technologies for Configurable Products ». In : *AI Magazine* 32.3 (2011), p. 99–108 (cf. p. 85).

- [Faltings1994] B. FALTINGS. « Arc Consistency for Continuous Variables ». In : *Artificial Intelligence*. T. 65. 1994, p. 363–376 (cf. p. 52, 54).
- [Fayyad+1996] U. M. FAYYAD, G. PIATETSKY-SHAPIO, P. SMYTH et R. UTHURUSAMY, édés. *Advances in Knowledge Discovery and Data Mining*. Menlo Park, CA, USA : American Association for Artificial Intelligence, 1996 (cf. p. 46, 57).
- [Felfernig+2000] A. FELFERNIG, G. E. FRIEDRICH et D. JANNACH. « UML AS DOMAIN SPECIFIC LANGUAGE FOR THE CONSTRUCTION OF KNOWLEDGE-BASED CONFIGURATION SYSTEMS ». In : *International Journal of Software Engineering and Knowledge Engineering* 10.04 (2000), p. 449–469. eprint : <http://www.worldscientific.com/doi/pdf/10.1142/S0218194000000249> (cf. p. 84).
- [Felfernig+2009] A. FELFERNIG, G. FRIEDRICH, K. ISAK, K. SHCHEKOTYKHIN, E. TEPPAN et D. JANNACH. « Automated debugging of recommender user interface descriptions ». English. In : *Applied Intelligence* 31.1 (2009), p. 1–14 (cf. p. 47, 84).
- [Felfernig+2012] A. FELFERNIG, M. SCHUBERT et C. ZEHENTNER. « An Efficient Diagnosis Algorithm for Inconsistent Constraint Sets ». In : *Artif. Intell. Eng. Des. Anal. Manuf.* 26.1 (fév. 2012), p. 53–62 (cf. p. 84).
- [Felfernig+2014] A. FELFERNIG, L. HOTZ, C. BAGLEY et J. TIIHONEN. *Knowledge-based Configuration: From Research to Business Cases*. 1^{re} éd. San Francisco, CA, USA : Morgan Kaufmann Publishers Inc., 2014 (cf. p. 30, 32, 33, 40).
- [Felfernig+2015] A. FELFERNIG, S. REITERER, M. STETTINGER et J. TIIHONEN. « Intelligent Techniques for Configuration Knowledge Evolution ». In : *Proceedings of the Ninth International Workshop on Variability Modelling of Software-intensive Systems*. VaMoS '15. Hildesheim, Germany : ACM, 2015, 51 :51–51 :58 (cf. p. 47, 84).
- [Ferguson+2006] A. FERGUSON et B. O SULLIVAN. « Relaxations and Explanations for Quantified Constraint Satisfaction Problems ». In : *Principles and Practice of Constraint Programming - CP 2006* (2006), p. 690–694 (cf. p. 85).
- [Finkel+1974] R.A. FINKEL et J.L. BENTLEY. « Quadrees : a data structure for retrieval on composite keys ». In : *Acta Infomatica*. 1974, p. 1–9 (cf. p. 55).
- [Finnie+2003] G. FINNIE et Z. SUN. « R 5 model for case-based reasoning ». In : *Knowledge-Based Systems* 16.1 (2003), p. 59–65 (cf. p. 46, 56).
- [Fowler+2005] D. W. FOWLER, Derek D. SLEEMAN, G. WILLS, T. LYON et D. KNOTT. « The Designers Workbench: Using Ontologies and Constraints for Configuration ». English. In : *Applications and Innovations in Intelligent Systems XII*. Sous la dir. d'A. MACINTOSH, R. ELLIS et T. ALLEN. Springer London, 2005, p. 209–221 (cf. p. 44).
- [Freuder1982] E. C. FREUDER. « A Sufficient Condition for Backtrack-Free Search ». In : *J. ACM* 29.1 (jan. 1982), p. 24–32 (cf. p. 52).
- [Gelle+1995] E. GELLE et R. WEIGEL. « Interactive Configuration Based on Incremental Constraint Satisfaction ». In : *IFIP*. 1995, p. 117–126 (cf. p. 40, 41).
- [Gelle+2003] E. GELLE et B. FALTINGS. « Solving Mixed and Conditional Constraint Satisfaction Problems ». In : *Constraints*. 2003, p. 107–141 (cf. p. 39).
- [Glover+1993] F. GLOVER et M. LAGUNA. « Tabou search ». In : *Modern Heuristic Techniques for Combinatorial Problems*. Oxford, England, 1993 (cf. p. 53).
- [Golomb+1965] S. GOLOMB et I. BAUMERT. « Backtrack programming ». In : *Journal of ACM* 12(4) (1965), p. 516–524 (cf. p. 52).

-
- [GoncalvesCoelho2004] A. GONCALVES-COELHO. « Axiomatic Design and the concurrent engineering paradigm ». In : *Porceedings of COSME*. 2004 (cf. p. 32).
- [Gourc2006] D. GOURC. « Towards a general model of the risk for the management of the activities : proposals for an integrated approach of project management and risk management ». Habilitation à diriger des recherches. Institut National Polytechnique de Toulouse - INPT, avr. 2006 (cf. p. 82).
- [Gruber1993] T. GRUBER. « A translation approach to portable ontology specifications ». In : *Knowledge Acquisition* 5.2 (1993), p. 199–220 (cf. p. 44).
- [Haag+2006] A. HAAG, U. JUNKER et B. O SULLIVAN. « A survey of explanation techniques for configurators ». In : *Proceedings of ECAI-2006 Workshop on Configuration* 41 (2006), p. 44 (cf. p. 85).
- [Han2005] J. HAN. *Data Mining: Concepts and Techniques*. San Francisco, CA, USA : Morgan Kaufmann Publishers Inc., 2005 (cf. p. 57).
- [Haralick+1980] R.M. HARALICK et G.L. ELLIOT. « Increasing Tree Search Efficiency for Constraint Satisfaction Problem ». In : *Artificial Intelligence*. T. 14. 1980, p. 263–313 (cf. p. 53).
- [Heijst+1997] G. van HEIJST, A. T. SCHREIBER et B. J. WIELINGA. « Using explicit ontologies in KBS development ». In : *International Journal of Human-Computer Studies* 42.2/3 (1997), p. 183–292 (cf. p. 44).
- [Hvam+2002] L. HVAM, J. RIIS et M. MALIS. « A multi-prescriptive approach for the design of configuration systems ». In : *European Conference on Artificial Intelligence (ECAI02). Workshop on Configuration*. Lyon, France, 2002, p. 56–62 (cf. p. 31, 32, 65).
- [Hvam+2014] L. HVAM, M. BONEV, A. HAUG et N. MORTENSEN. « The Use of Modelling Methods for Product Configuration in Industrial Applications ». English. In : *Proceedings of the 7th World Conference on Mass Customization, Personalization, and Co-Creation (MCPC 2014), Aalborg, Denmark, February 4th - 7th, 2014*. Sous la dir. de Thomas D. BRUNOE, Kjeld NIELSEN, Kaj A. JOERGENSEN et Stig B. TAPS. Lecture Notes in Production Engineering. Springer International Publishing, 2014, p. 529–539 (cf. p. 32, 84).
- [Inakoshi+2001] H. INAKOSHI, S. OKAMOTO, Y. OHTA et N. YUGAMI. « Effective Decision Support for Product Configuration by Using CBR ». In : *Proceedings of the Fourth International Conference on Case-Based Reasoning (ICCBR)*. 2001 (cf. p. 47).
- [ISO900020002005] ISO9000 :2000. *Quality management systems - Fundamentals and vocabulary*. International Organisation of Standardization, 2005 (cf. p. 75).
- [Junker+2003] U. JUNKER et D. MAILHARRO. « Preference Programming: Advanced Problem Solving for Configuration ». In : *Artif. Intell. Eng. Des. Anal. Manuf.* 17.1 (jan. 2003), p. 13–29 (cf. p. 85).
- [Junker2004] Ulrich JUNKER. « QUICKXPLAIN : preferred explanations and relaxations for over-constrained problems ». In : *AAAI* 4 (2004), p. 167–172 (cf. p. 85).
- [Junker2008] U. JUNKER. « Preference-Based Problem Solving for Constraint Programming ». English. In : *Recent Advances in Constraints*. Sous la dir. de François FAGES, Francesca ROSSI et Sylvain SOLIMAN. T. 5129. Lecture Notes in Computer Science. Springer Berlin Heidelberg, 2008, p. 109–126 (cf. p. 85).
- [Jussien1997] Narendra JUSSIEN. « Constraint relaxation for dynamic problems ». Theses. Université Rennes 1, oct. 1997 (cf. p. 85).

- [Kirkpatrick+1983] S. KIRKPATRICK, C.D. GELATT et M.P. VECCHI. « Optimization by simulated Annealing ». In : *Science*. T. 200. 1983, p. 671–680 (cf. p. 53).
- [Kolodner1993a] J. KOLODNER. « Case-Based Reasoning ». In : *Morgan Kaufmann Publishet*. 1993 (cf. p. 56).
- [Kolodner1993b] J. KOLODNER. *Case-based Reasoning*. San Francisco, CA, USA : Morgan Kaufmann Publishers Inc., 1993 (cf. p. 46, 47, 56).
- [Kowalczyk1997] R. KOWALCZYK. « Constraint Consistent Genetic Algorithms ». In : *Proc. of IEEE conf. on evolutionary computation*. 1997, p. 343–348 (cf. p. 60).
- [Koziel+1999] S. KOZIEL et Z. MICHALEWICZ. « Evolutionary algorithms, homomorphous mapping and constrained parameter optimisation ». In : *Evolutionary Computation 7.1* (1999), p. 19–44 (cf. p. 60).
- [Kurgan+2006] L. A. KURGAN et P. MUSILEK. « A Survey of Knowledge Discovery and Data Mining Process Models ». In : *Knowl. Eng. Rev.* 21.1 (mar. 2006), p. 1–24 (cf. p. 46, 57).
- [Lamesle+2005] P. LAMESLE, E. VAREILLES et M. ALDANONDO. « Towards a KBS for a qualitative distortions prediction for heat treatments ». In : *International conference on Distortion Engineering, IDE'05*. Bremen, Germany, oct. 2005 (cf. p. 67).
- [Lhomme1993] O. LHOMME. « Consistency techniques for numeric CSP ». In : *International Joint Conference on Artificial Intelligence*. Chambéry, France, août 1993, p. 232–238 (cf. p. 52, 54, 55).
- [Liao+2012] S.-H. LIAO, P.-H. CHU et P.-Y. HSIAO. « Review: Data Mining Techniques and Applications - A Decade Review from 2000 to 2011 ». In : *Expert Syst. Appl.* 39.12 (sept. 2012), p. 11303–11311 (cf. p. 46, 57).
- [Lobjois+1997] L. LOBJOIS et M. LEMAITRE. « Coopération entre méthodes complètes et incomplètes pour la résolution de (V)CSP : une tentative d'inventaire ». In : *Journées Nationales de la Résolution Pratique de Problèmes NP-complets*. Rennes, France, 1997, p. 67–73 (cf. p. 53).
- [Lottaz2000] C. LOTTAZ. « Collaborative Design using Solution Spaces ». Thèse de doctorat. École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse, 2000 (cf. p. 55).
- [Lu+2008] R. LU, W.L. PENG et C. WANG. « Integration of Product Design Process and Task Management for Product Data Management Systems ». English. In : *Research and Practical Issues of Enterprise Information Systems II*. Sous la dir. de Xu LiD., Tjoa A.MIN et Chaudhry SOHAILS. T. 254. IFIP The International Federation for Information Processing. Springer US, 2008, p. 207–218 (cf. p. 74, 75).
- [M+1998] Schoenauer M. et Z. MICHALEWICZ. « Sphere operators and their applicability for constrained parameter optimization problems ». In : *Proceedings of the seventh Annual Conference on Evolutionary Programming*. Sous la dir. de B. editor PORTO. Springer Verlag, 1998 (cf. p. 60).
- [Mackworth1977] A.K. MACKWORTH. « Consistency in Networks of Relations ». In : *Artificial Intelligence*. T. 8(1). 1977, p. 99–118 (cf. p. 52, 54).
- [Marmier+2013] F. MARMIER, D. GOURC et F. LAARZ. « A risk oriented model to assess strategic decisions in new product development projects ». In : *Decision Support Systems* 56 (2013), p. 74–82 (cf. p. 82).

-
- [Marmier2014] F. MARMIER. « Contribution au pilotage des projets et des processus par la prise en compte d'informations relatives aux activités, aux produits, aux ressources et aux risques. » Thèse de doct. Institut National Polytechnique de Toulouse - INPT, 2014 (cf. p. 82).
- [McDonald+2002] K. McDONALD et P. PROSSER. *A case study of constraint programming for configuration problems*. Rapp. tech. APES-45-2002. APES Research Group, 2002 (cf. p. 41).
- [Meiri1996] I. MEIRI. « Combining qualitative and quantitative constraints in temporal reasoning ». In : *Artificial Intelligence* 87.1-2 (1996), p. 343–385 (cf. p. 40).
- [Michalewicz+1991] Z. MICHALEWICZ et C.Z. JANIKOW. « Handling constraints in genetic algorithms ». In : *Proceedings of the 4th International Conference on Genetic Algorithms*. Sous la dir. de R. K. BELEW et L.B. editors BOOKER. Morgan Kaufmann, 1991, p. 151–157 (cf. p. 60).
- [Michalewicz+1995] Z. MICHALEWICZ et G. NAZHIYATH. « Genocop III : A co-evolutionary algorithm for numerical optimization with nonlinear constraints ». In : *Proceedings of the second IEEE International Conference on Evolutionary Computation*. Sous la dir. de Fogel EDITOR. IEEE Press, 1995, p. 647–651 (cf. p. 60).
- [Michalewicz1996] Z. MICHALEWICZ. *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs*. Berlin : Springer-Verlag, 1996 (cf. p. 59).
- [Mittal+1990] S. MITTAL et B. FALKENHAINER. « Dynamic Constraint Satisfaction Problems ». In : *AAAI*. Boston, US, 1990, p. 25–32 (cf. p. 39, 41, 54).
- [Montanari1974] U. MONTANARI. « Networks of constraints : fundamental properties and application to picture processing ». In : *Information sciences*. T. 7. 1974, p. 95–132 (cf. p. 38, 40, 52).
- [Montani2011] S. MONTANI. « How to Use Contextual Knowledge in Medical Case-based Reasoning Systems: A Survey on Very Recent Trends ». In : *Artif. Intell. Med.* 51.2 (fév. 2011), p. 125–131 (cf. p. 46, 47).
- [Moore1966] R.E. MOORE. *Interval Analysis*. Prentice-Hall, 1966 (cf. p. 54, 55).
- [Mouhoub+2005] M. MOUHOU et A. SUKPAN. « A New Temporal CSP Framework Handling Composite Variables and Activity Constraints ». In : *the 17th IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence (ICTAI'05)*. 2005, p. 143–149 (cf. p. 41).
- [Moynard2003] G. MOYNARD. « Contribution au déploiement de progiciels de configuration dans l'industrie : éléments de modélisation et d'estimation ». Thèse de doctorat. Institut National Polytechnique de Toulouse, 2003 (cf. p. 33).
- [Mulyanto2002] T. MULYANTO. « Utilisation des techniques de programmation par contraintes pour la conception d'avions ». Thèse de doctorat. Toulouse, France : École Nationale Supérieure de l'Aéronautique et de l'Espace, 2002 (cf. p. 39).
- [Myung+1995] J.H. MYUNG M. Kim et D.B. FOGEL. « Preliminary investigation into a two-stage method of evolutionary optimization on constrained problems ». In : *Proceedings of the fourth Annual Conference on Evolutionary Programming*. Sous la dir. de J.R. McDONNELL, R. G. REYNOLDS et D. B. editors FOGEL. MIT Press, 1995, p. 449–463 (cf. p. 60).
- [Narodytska+2007] N. NARODYTSKA et T. WALSH. « Constraint and Variable Ordering Heuristics for Compiling Configuration Problems ». In : *IJCAI-2007*. Hyderabad, India, jan. 2007, p. 149–154 (cf. p. 53).

- [Neumann1988] B. NEUMANN. « Configuration expert systems : a case study and tutorial ». In : *SGAICO Conference on Artificial Intelligence in Manufacturing, Assembly and Robotics*. Munich, Germany, 1988, p. 27–68 (cf. p. 44).
- [Nikolaidou+2002] M. NIKOLAIDOU et D. ANAGNOSTOPOULOS. « Web-Based System Configuration and Performance Evaluation Using a Knowledge-Based Methodology. » In : *EC-Web*. Sous la dir. de Kurt BAUKNECHT, A Min TJOA et Gerald QUIRCHMAYR. T. 2455. Lecture Notes in Computer Science. Springer, 2002, p. 284–293 (cf. p. 64).
- [Niveau+2010] A. NIVEAU, H. FARGIER, C. PRALET et G. VERFAILLIE. « Knowledge Compilation Using Interval Automata and Applications to Planning. » In : *ECAI*. Sous la dir. d’Helder COELHO, Rudi STUDER et Michael WOOLDRIDGE. T. 215. Frontiers in Artificial Intelligence and Applications. IOS Press, 2010, p. 459–464 (cf. p. 53).
- [Nortet+2005] C. NORTET, A. SALLEB, T. TURMEAUX et C. VRAIN. « Extraction de règles d’association quantitatives - Application à des données médicales. » In : *EGC*. Sous la dir. de S. PINSON et N. VINCENT. T. RNTI-E-3. Revue des Nouvelles Technologies de l’Information. Cépaduès-Éditions, 2005, p. 495–506 (cf. p. 47).
- [Nunez+2004] H. NUNEZ, M. SANCHEZMARRE, U. CORTES, J. COMAS, M. MARTINEZ, I. RODRIGUEZRODA et M. POCH. « A comparative study on the use of similarity measures in case-based reasoning to improve the classification of environmental system situations ». In : *Environmental Modelling & Software* 19.9 (sept. 2004), p. 809–819 (cf. p. 57).
- [Ouis+2003] S. OUIS, N. JUSSIEN et P. BOIZUMAULT. « k-relevant Explanations for Constraint Programming ». In : *Proceedings of the Sixteenth International Florida Artificial Intelligence Research Society Conference, May 12-14, 2003, St. Augustine, Florida, USA*. 2003, p. 192–196 (cf. p. 85).
- [Pantazi+2004] S. PANTAZI, J. AROCHA et J. MOEHR. « Case-based medical informatics ». In : *BMC Medical Informatics and Decision Making* 4.1 (2004), p. 19 (cf. p. 46).
- [Parmee+1994] I.C. PARMEE et G. PURCHASE. « The development of directed genetic search technique for heavily constrained design spaces ». In : *Proceedings of the Conference on Adaptive Computing in Engineering Design and Control*. University of Plymouth. 1994, p. 97–102 (cf. p. 60).
- [Piette2008] C. PIETTE. « Let the Solver Deal with Redundancy ». In : *Tools with Artificial Intelligence, 2008. ICTAI ’08. 20th IEEE International Conference on*. T. 1. Nov. 2008, p. 67–73 (cf. p. 84).
- [Piller+2014] F. T. PILLER et P. BLAZEK. « Core Capabilities of Sustainable Mass Customization ». In : Morgan Kaufmann Publisher, 2014. Chap. 9, p. 107–120 (cf. p. 64).
- [Pine1999] B.J. PINE. *Mass Customization : The new Frontier in business Competition*. Harvard Business School, 1999 (cf. p. 30, 64).
- [Pitiot+2010a] P. PITIOT, M. ALDANONDO, M. DJEFEL, E. VAREILLES, P. GABORIT et T. COUDERT. « Using constraints filtering and evolutionary algorithms for interactive configuration and planning ». In : *Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM), 2010 IEEE International Conference on*. Best Paper Award. Déc. 2010, p. 1921–1925 (cf. p. 61, 71).
- [Pitiot+2010b] P. PITIOT, M. ALDANONDO, E. VAREILLES, E. GABORIT, M. DJEFEL et C. BARON. « Aiding Interactive Configuration and Planning: A Constraint and Evolutionary Approach ». In : *Artificial Intelligence Applications and Innovations*. Sous la dir. d’Harris Papadopoulos ; Andreas S. Andreou ; Max BRAMER. T. 339. IFIP Advances in Information and Communication Technology. Springer, 2010, p. 238–245 (cf. p. 61).

-
- [Pitiot+2012a] P. PITIOT, M. ALDANONDO, E. VAREILLES et P. GABORIT. « Configuration / Planification : Expérimentations en Optimisation évolutionnaire sous contraintes ». In : *9th International Conference of Modeling and Simulation, MOSIM 2010*. Bordeaux, France, juin 2012, p. 740–747 (cf. p. 61).
- [Pitiot+2012b] P. PITIOT, M. ALDANONDO, E. VAREILLES, L. ZHANG et L. COUDERT. « Some Experimental Results Relevant to the Optimization of Configuration and Planning Problems ». In : *Foundations of Intelligent Systems - 20th International Symposium, ISMIS 2012, Macau, China, December 4-7, 2012. Proceedings*. 2012, p. 301–310 (cf. p. 61).
- [Pitiot+2013a] P. PITIOT, M. ALDANONDO, E. VAREILLES, T. COUDERT et L. ZHANG. « Optimizing concurrent configuration and planning : A proposition to reduce computation time ». In : *Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM), 2013 IEEE International Conference on*. Outstanding Paper Award. Déc. 2013, p. 1367–1371 (cf. p. 61).
- [Pitiot+2013b] P. PITIOT, M. ALDANONDO, E. VAREILLES, P. GABORIT, M. DJEFEL et S. CARBONEEL. « Concurrent product configuration and process planning, towards an approach combining interactivity and optimality ». In : *International Journal of Production Research* 51.2 (2013). *WoS**, p. 524–541 (cf. p. 61, 68).
- [Pitiot+2014] P. PITIOT, M. ALDANONDO et E. VAREILLES. « Concurrent product configuration and process planning: Some optimization experimental results ». In : *Computers in Industry* 65.4 (2014). *WoS**, p. 610–621 (cf. p. 61, 74, 83).
- [Pitiot2009] P. PITIOT. « Amélioration des techniques d’optimisation combinatoire par utilisation d’un mécanisme de retour d’expérience : Application à la sélection de scénarios en conception préliminaire de produit-projet ». Thèse de doct. Écoles Nationale d’Ingénieur de Tarbes, 2009 (cf. p. 58).
- [Prudhomme+2014] C. PRUD’HOMME, X. LORCA et N. JUSSIEN. « Explanation-based large neighborhood search ». In : *Constraints* 19.4 (2014), p. 339–379 (cf. p. 85).
- [Purvis+1995] L. PURVIS et P. PU. « Adaptation Using Constraint Satisfaction Techniques ». In : *Case-Based Reasoning Research and Development*. Sous la dir. de M. VELOSO et A. AAMODT. Berlin, Springer, 1995, p. 289–300 (cf. p. 47).
- [Qin+2009] YH. QIN et GX. WEI. « Product Configuration Based on CBR and CSP ». In : *Measuring Technology and Mechatronics Automation, 2009. ICMTMA ’09. International Conference on*. T. 3. Avr. 2009, p. 681–684 (cf. p. 47).
- [Rabiser+2014] R. RABISER, M. VIERHAUSEN, P. GRUNBACHER et T. MANNISTO. « Configuring and Generating Technical Documents ». In : Morgan Kaufmann Publisher, 2014. Chap. 9, p. 241–250 (cf. p. 65, 66).
- [Reysset2015] A. REYSSET. « Preliminary design of electromechanical actuators – development of tools dedicated to technical specification and optimal sizing sequence conditioning ». Theses. INSA de Toulouse, jan. 2015 (cf. p. 78).
- [Richardson+2009] J.T. RICHARDSON, M.R. PALMER, G. LIEPINS et M. HILLIARD. « Some guidelines for GA with penalty functions ». In : *Third international conference on GA*. Schaffer, J.D. Editor, 2009, p. 175–192 (cf. p. 59).
- [Roldan Reyes+2015] E. ROLDAN REYES, S. S. NEGNY, G. CORTES ROBLES et J.M. LE LANN. « Improvement of online adaptation knowledge acquisition and reuse in case-based reasoning: Application to process engineering design ». In : *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 41 (2015), p. 1–16 (cf. p. 47).

- [Roldan+2011] E. ROLDAN, S. NEGNY, Le Lann J.-M. et G. CORTES ROBLES. « Modified Case Based Reasoning cycle for Expert Knowledge Acquisition during Process design ». In : *ESCAPE 21, 21th European Symposium on Computer-Aided Process Engineering (ESCAPE 21)*. Chalkidiki, Grece, juin 2011, pp. 296–300 (cf. p. 47).
- [Romero Bejarano+2014] J. C. ROMERO BEJARANO, T. COUDERT, E. VAREILLES, L. GENESTE, M. ALDANONDO et J. ABEILLE. « Case-based reasoning and system design: An integrated approach based on ontology and preference modeling ». In : *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing* 28 (01 fév. 2014). WoS*, p. 49–69 (cf. p. 45).
- [Romero Bejarano2013] J.D. ROMERO BEJARANO. « Collaborative problem solving within supply chains : general framework, process and methodology ». Thèse de doct. Laboratoire Génie de Production - LGP (Tarbes, France), déc. 2013 (cf. p. 78).
- [Rossi+2006] F. ROSSI, P. van BEEK et T. WALSH. *Handbook of Constraint Programming (Foundations of Artificial Intelligence)*. New York, NY, USA : Elsevier Science Inc., 2006 (cf. p. 41, 52, 53).
- [Ruet+2002] Magali RUET et Laurent GENESTE. « Search and Adaptation in a Fuzzy Object Oriented Case Base ». English. In : *Advances in Case-Based Reasoning*. Sous la dir. de Susan CRAW et Alun PREECE. T. 2416. Lecture Notes in Computer Science. Springer Berlin Heidelberg, 2002, p. 350–364 (cf. p. 47).
- [Sabin+1996] D. SABIN et E.C. FREUDER. « Configuration as Composite Constraint Satisfaction ». In : *Artificial Intelligence and Manufacturing Research Planning Workshop*. 1996, p. 153–161 (cf. p. 31, 32, 41).
- [Sabin+1998] D. SABIN et R. WEIGEL. « Product configuration frameworks - A survey ». In : *IEEE Intelligent System and their Applications* (1998) (cf. p. 30, 31).
- [Sabin+1999] M. SABIN et E.C. FREUDER. « Detecting and resolving inconsistency and redundancy in conditional constraint satisfaction problems ». In : *International Configuration Workshop*. 1999 (cf. p. 84).
- [SalcedoSanz2009] S. SALCEDO-SANZ. « A survey of repair methods used as constraint handling techniques in evolutionary algorithms ». In : *Computer science review* (2009), p. 175–192 (cf. p. 60).
- [Samet1984] H. SAMET. « The Quadtree and related hierarchical structures ». In : *Computing surveys*. T. 16. 1984, p. 187–260 (cf. p. 55).
- [SamHaroud+1996] D. SAM-HAROUD et B. FALTINGS. « Consistency Techniques for Continuous Constraints ». In : *Constraints Journal* (1996), p. 85–118 (cf. p. 54).
- [SamHaroud1995] J. SAM-HAROUD. « Constraint consistency techniques for continuous domains ». Thèse de doct. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 1995 (cf. p. 55, 56).
- [Schoenauer+1993] M. SCHOENAUER et S. XANTHAKIS. « Constrained GA optimization ». In : *Proceedings of the 5th International Conference on Genetic Algorithms*. Sous la dir. de S. editor FORREST. Morgan Kaufmann, 1993, p. 573–580 (cf. p. 60).
- [Sharon+2008] A. SHARON, V. PERELMAN et D. DORI. « A Project-Product Lifecycle Management approach for improved systems engineering practices ». In : *INCOSE International Symposium* 18.1 (2008), p. 942–957 (cf. p. 74, 75).

-
- [Sharon+2009] A. SHARON, O. L. de WECK et D. DORI. « Is there a Complete Project Plan ? A Model-Based Project Planning Approach ». In : *Proceedings of the 19th Annual International INCOSE Symposium*. Paper 329. International Council on Systems Engineering. Singapore, juil. 2009 (cf. p. 74, 75).
- [Sinz+2007] C. SINZ, A. HAAG, N. NARODYTSKA, T. WALSH, E. GELLE, M. SABIN, U. JUNKER, B. O'SULLIVAN, D. RABISER, D. DHUNGANA, P. GRUNBACHER, K. LEHNER, C. FEDERSPIEL et D. NAUS. « Configuration ». In : *IEEE Intelligent Systems* 22.1 (2007), p. 78–90 (cf. p. 85).
- [Soininen+1998] T. SOININEN, J. TIIHONEN, T. MANNISTO et R. SULONENE. « Towards a general ontology of configuration ». In : *AI EDAM-ARTIFICIAL INTELLIGENCE FOR ENGINEERING DESIGN ANALYSIS AND MANUFACTURING* 12.4 (1998), p. 357–372 (cf. p. 44).
- [Soininen+1999] T. SOININEN et E. GELLE. « Dynamic Constraint Satisfaction in Configuration ». In : *American Association for Artificial Intelligence, Workshop on Configuration*. Orlando, US, 1999 (cf. p. 41).
- [Soininen1999] I. SOININEN T. and Niemelä. « Developing a declarative rule language for application in product configuration ». In : *Workshop on Practical Aspect of Declarative Language (PADL 99), Lecture Notes in Computer science*. Sous la dir. de springer- VERLAG. San-Fransisco, 1999 (cf. p. 31).
- [Sowa1984] J. F. SOWA. *Conceptual Structures: Information Processing in Mind and Machine*. Boston, MA, USA : Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., 1984 (cf. p. 44).
- [Squalli+1998] M. H. SQUALLI et E. C. FREUDER. « Integration of CSP and CBR to compensate for incompleteness and incorrectness of models ». In : *AAAI-98 Spring Symposium on Multimodal Reasoning, Technical Report SS-98-04*. Stanford University, California, USA, 1998, p. 74–79 (cf. p. 47).
- [Staab+2009] S. STAAB et R. STUDER. *Handbook on Ontologies*. 2nd. Springer Publishing Company, Incorporated, 2009 (cf. p. 44).
- [Studer+1998] R. STUDER, V. RICHARD BENJAMINS et D. FENSEL. « knowledge engineering : Principles and methods ». In : *Data & Knowledge Engineering*, 25.1-2 (1998), p. 161–197 (cf. p. 44).
- [Stumptner+1998] Markus STUMPTNER, Gerhard E FRIEDRICH et Alois HASELBÖCK. « Generative constraint-based configuration of large technical systems ». In : *AI EDAM* 12.04 (1998), p. 307–320 (cf. p. 41).
- [Stumptner1997] M. STUMPTNER. « An Overview of Knowledge-Based Configuration ». In : *AI Commun.* 10.2 (avr. 1997), p. 111–125 (cf. p. 30, 64).
- [Suh1990] N.P. SUH. *The principles of Design*. Oxford series on Advance Manufacturing. New York : Oxford University Press, 1990 (cf. p. 32, 73).
- [Surry+1995] N.J. SURRY P.D. and Radcliffe et I. D. BOYD. « A multi-objective approach to constrained optimization of gas supply networks ». In : *Proceedings of the AISB-95 Workshop on Evolutionary Computing*. Sous la dir. de T. FOGARTY. T. 993. Springer Verlag, 1995, p. 166–180 (cf. p. 60).
- [Tiihonen+1996] J. TIIHONEN, T. SOININEN, T. MÄNNISTÖ et R. SULONEN. *State-of-the-practice in product configuration - a survey of 10 cases in the Finnish industry*. Rapp. tech. Helsinki University of Technology Otakaari, Finland : IIA-Research Center, 1996 (cf. p. 31, 65).

- [Tiihonen+1997] J. TIIHONEN et T. SOININEN. *Product Configurators - Information system support for configurable product*. Rapp. tech. Helsinki University of Thechnology, Finland : TAI Research center et laboratory of information processing science, Product Data Management Group, 1997 (cf. p. 33).
- [Tiihonen+2014] J. TIIHONEN, W. MAYER, M. STUMPTNER et M. HEISKALA. « Configuring services and Processes ». In : Morgan Kaufmann Publisher, 2014. Chap. 9, p. 251–260 (cf. p. 65).
- [Tsamardinos+2003] I. TSAMARDINOS, T. VIDAL et M.E. POLLACK. « CTP : A New Constraint-Based Formalism for Conditionnal Temporal Planning ». In : *Constraints* 8.4 (2003), p. 365–388 (cf. p. 41).
- [Tsang1993] E. TSANG. « Foundations of constraints satisfaction ». In : *Academic Press*. London, 1993 (cf. p. 40).
- [Tseng+2007] M. M. TSENG et J. JIAO. « Mass Customization ». In : *Handbook of Industrial Engineering*. John Wiley & Sons, Inc., 2007, p. 684–709 (cf. p. 64).
- [Valente+1996] A. VALENTE et J. BREUKER. « Towards principled core ontologies ». In : *Proceedins of the Knowledge Acquisition Workshop*. Sous la dir. de V. GAINES et M. MUSEN. Banff, Canada, 1996 (cf. p. 44).
- [Van Oudenhoove de Saint G  ry2006] T. VAN OUDENHOVE DE SAINT GÉRY. « Contribution à l’élaboration d’un formalisme gérant la pertinence pour les problèmes d’aide à la conception à base de contraintes ». Thèse de doct. Institut National Polytechnique de Toulouse, 2006 (cf. p. 39, 54).
- [Vareilles+2003] E. VAREILLES, M. ALDANONDO, K. HADJ-HAMOU, P. GABORIT, P. LAMESLE et J. MAURY. « Modélisation des connaissances et aide à la décision : une application en traitement thermique ». In : *5   Congrès International de Génie Industriel*. Quebec Canada, oct. 2003 (cf. p. 56).
- [Vareilles+2004] E. VAREILLES, M. ALDANONDO, K. HADJ-HAMOU et P. GABORIT. « Application des techniques CSP pour la configuration d’un traitement thermique particulier ». In : *1   Journées Francophones de Programmation par Contraintes JFPC 2004*. Angers France, juin 2004 (cf. p. 56, 67).
- [Vareilles+2006] E. VAREILLES, M. ALDANONDO, P. GABORIT et K. HADJ-HAMOU. « Evaluation of a solution in interactive aiding design process ». In : *IFAC International Symposium on Information Control Problems in Manufacturing INCOM*. Sous la dir. d’A. Dolgui et AL. T. 2. Saint Etienne, France : Elsevier Science, mai 2006, p. 757–762 (cf. p. 67).
- [Vareilles+2007a] E. VAREILLES, M. ALDANONDO et P. GABORIT. « **Evaluation and design: a knowledge-based approach** ». In : *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* 20.7 (2007). *WoS**, p. 639–653 (cf. p. 67).
- [Vareilles+2007b] E. VAREILLES, M. ALDANONDO, Y. LAHMAR, C. BARON, L. GENESTE et M. ZOLGHADRI. « Coupling Product Development and Project Management with Constraint : a Prospective Work ». In : *5  th International Conference on Product Lifecycle Management*. Italy, juil. 2007, p. 137–146 (cf. p. 43, 74).
- [Vareilles+2009a] E. VAREILLES, M. ALDANONDO et P. GABORIT. « How to take into account piecewise constraints in constraint satisfaction problems. » In : *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 22.4-5 (mai 2009). *WoS**, p. 778–785 (cf. p. 46, 54, 56).

-
- [Vareilles+2009b] E. VAREILLES, S. CARBONNEL, M. DJEFEL et M. ALDANONDO. « Coupling Product and Project Configuration with Constraints : a CSP Software Comparison ». In : *3th Int. conf. on Software, Knowledge Information, SKIMA 2009*. Fes, Maroc, oct. 2009 (cf. p. 54).
- [Vareilles+2012a] E. VAREILLES, M. ALDANONDO, A. CODET DE BOISSE, T. COUDERT, P. GABORIT et L. GENESTE. « How to take into account general and contextual knowledge for interactive aiding design : Towards the coupling of CSP and CBR approaches. » In : *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 25.1 (2012). WoS*, p. 31–47 (cf. p. 47, 48, 58, 69).
- [Vareilles+2012b] E. VAREILLES, T. COUDERT, M. ALDANONDO, L. GENESTE et J. ABEILLE. « Coupling system design and project planning : discussion on a bijective link between system and project structures ». In : *14th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing, INCOM'2012*. Bucharest, Romania, 2012, pp. 1089–1094 (cf. p. 74).
- [Vareilles+2012c] E. VAREILLES, P. GABORIT, M. ALDANONDO, S. CARBONNEL et L. STEFFAN. « CoFiADe Constraints Filtering for Aiding Design ». In : *8^e Journées Francophones de Programmation par Contraintes JFPC 2012*. Toulouse France, juin 2012 (cf. p. 34, 54).
- [Vareilles+2013a] E. VAREILLES, A.F. BARCO SANTA, M. FALCON, M. ALDANONDO et P. GABORIT. « Configuration of high performance apartment buildings renovation : A constraint based approach ». In : *Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM), 2013 IEEE International Conference on*. Déc. 2013, p. 684–688 (cf. p. 43, 70).
- [Vareilles+2013b] E. VAREILLES, C. THUESEN, M. FALCON et M. ALDANONDO. « Interactive configuration of high performance renovation of apartment buildings by the use of CSP ». In : *15th International Configuration Workshop*. Vienna Austria, août 2013 (cf. p. 43).
- [Vareilles+2015] E. VAREILLES, T. COUDERT, M. ALDANONDO, L. GENESTE et J. ABEILLE. « System Design and Project Planning : model and rules to manage their interactions ». In : *Integrated Computer-Aided Engineering* (2015). WoS* (cf. p. 77).
- [Vareilles2005] E. VAREILLES. « Conception et approches par propagation de contraintes : contribution à la mise en oeuvre d'un outils d'aide interactif ». Thèse de doct. Institut National Polytechnique de Toulouse, juin 2005 (cf. p. 25, 38–42, 45, 52, 54, 56, 66).
- [Vempaty1992] N.R. VEMPATY. « Solving Constraint Satisfaction Problems Using Finite State Automata ». In : *Swartout*. 1992, p. 453–458 (cf. p. 53).
- [Vernat2004] Y. VERNAT. « Formalisation et qualification de modèles par contraintes en conception préliminaire ». Thèse de doctorat. France : Ecole Nationale des Arts et Métier, Bordeaux, 2004 (cf. p. 38).
- [Veron2001] M. VERON. « Modélisation et résolution du problème de configuration industrielle : utilisation des techniques de satisfaction de contraintes ». Thèse de doctorat. France : Institut National Polytechnique de Toulouse, 2001 (cf. p. 31, 32, 41, 65).
- [Vilim+2004] P. VILIM, R. BARTAK et O. CEPEK. « Unary resource constraint with optional activities ». In : *In Proceedings CP 2004*. 2004, p. 62–76 (cf. p. 41).
- [Waagen+1992] D. WAAGEN, P. DIERCKS et J. McDONNELL. « The stochastic direction set algorithm : A technique for finding function extrema ». In : *Proceedings of the 1st Annual Conference on Evolutionary Programming*. Sous la dir. de D.B. FOGEL et W. editors ATMAR. Evolutionary Programming Society, 1992, p. 35–42 (cf. p. 60).
- [Wang+2011] L. WANG, W. KEONG NG et B. SONG. « Extended DCSP Approach on Product Configuration with Cost Estimation ». In : *Concurrent Engineering : R&A* 19.2 (2011), p. 123–138 (cf. p. 64).

- [Wang+2013] C.H. WANG et O.Z. HSUEH. « A novel approach to incorporate customer preference and perception into product configuration: A case study on smart pads ». In : *Computer Standards & Interfaces* 35.5 (2013), p. 549–556 (cf. p. 85).
- [Yannou1998] B. YANNOU. « Les apports de la programmation par contraintes en conception ». In : *Conception de produits mécaniques méthodes, modèles et outils*. Sous la dir. d'HERMÉS. 1998, p. 457–486 (cf. p. 39).
- [Yvars+2012] P.A. YVARS et Q. DUHAU. « Managing system configuration through constraint propagation in function and value analyses of product families ». In : *Journal of Engineering Design* 23.5 (2012), p. 361–377. eprint : <http://dx.doi.org/10.1080/09544828.2011.591774> (cf. p. 65, 70).
- [Zhang+2012a] L. ZHANG, E. VAREILLES, M. ALDANONDO et P. HELO. « Generic modeling propositions for configuring, sale, product and production ». In : *Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM), 2012 IEEE International Conference on*. Déc. 2012, p. 1959–1963 (cf. p. 43, 74).
- [Zhang+2012b] L. ZHANG, Q. XU, Y. YU et R. JIAO. « Domain-based production configuration with constraint satisfaction ». In : *International Journal of Production Research* 50.24 (2012). WoS*, p. 7149–7166. eprint : <http://dx.doi.org/10.1080/00207543.2011.640714> (cf. p. 65, 66, 75).
- [Zhang+2013] L. ZHANG, E. VAREILLES et M. ALDANONDO. « Generic bill of functions, materials and operations for SAP2 configuration ». In : *International Journal of Production Research* 51.2 (2013). WoS*, p. 465–478 (cf. p. 43, 74).
- [Zhang2014] L. ZHANG. « Product configuration: a review of the state-of-the-art and future research ». In : *INTERNATIONAL JOURNAL OF PRODUCTION RESEARCH* 52.21 (nov. 2014), p. 6381–6398 (cf. p. 71, 85).
- [Zitzler+1989] E. ZITZLER et L. THIELE. *An evolutionary algorithm for multiobjective optimization : the strength pareto approach*. Rapp. tech. Zurich, Suisse : Computer Engineering et Networks laboratory (TIK), Swiss Federal Institute of Technology (ETH), 1989 (cf. p. 58).
- [Zitzler+2001] E. ZITZLER, L. THIELE et M. LAUMANNNS. *SPEA2 : improving the strength pareto evolutionary algorithm*. Rapp. tech. Zurich, Suisse : Computer Engineering et Networks laboratory, , Swiss Federal Institute of Technology (ETH), 2001 (cf. p. 58).
- [Zolghadri+2007] M. ZOLGHADRI, C. BARON, P. GIRARD, M. ALDANONDO et E. VAREILLES. « Linking product architecture and network of partners ». In : *International Conference on Product Lifecycle Management*. Italy, juil. 2007, p. 353–362 (cf. p. 74).

Configuration interactive et Contraintes : Connaissances, Filtrage et Extensions

Les travaux de recherche présentés dans ce mémoire trouvent leurs fondements dans les constats suivants :

- la durée de vie des produits et systèmes tend à se réduire,
- les conceptions et les actualisations des produits mis sur le marché sont de plus en plus fréquentes alors que les cycles de conception sont toujours plus brefs,
- les technologies employées en constante évolution nécessitent une acquisition de connaissance permanente,
- la diversité des produits offerte sur les marchés ne cesse de croître allant des produits personnalisables ou configurés jusqu'aux produits sur-mesure et conçus à la commande.

Ces tendances et la masse d'informations et de connaissances à traiter en découlant exigent des concepteurs toujours plus d'attention et un travail cognitif toujours plus intense. Il en résulte une augmentation des risques, que le produit réponde imparfaitement aux besoins du demandeur, qu'il soit difficilement réalisable et fabricable, ou encore qu'il le soit à un coût prohibitif. L'objectif de nos travaux est donc de limiter ces risques et erreurs en proposant des outils logiciels et des environnements méthodologiques destinés à capitaliser et exploiter des connaissances générales, contextuelles, académiques, expertes ou métier pour aider la conception.

Les travaux effectués sur différentes problématiques industrielles ont conduit à prendre en considération deux natures de connaissances relevant du « domaine produit » et de la « diversité produit » conduisant à des problématiques industrielles différentes :

- la première nature de connaissance recouvre aussi bien des aspects scientifiques et techniques que des règles métier, elle est nécessaire pour la définition du produit et débouche sur des problématiques d'aide à la conception de produit,
- la seconde nature est une connaissance liée à la diversité des produits, qui débouche sur les problématiques d'aide à la personnalisation ou configuration de produit.

Nous visons à aider un type de conception plutôt « routinier » où de la connaissance de différentes natures et de divers types existe du fait de la récurrence de l'activité. Nous considérons de plus dans nos travaux que l'aide à la conception ou configuration peut se formaliser, complètement ou partiellement, comme un problème de satisfaction de contraintes (*CSP*). Dans ce cadre, nous nous intéressons plus spécifiquement à l'aide à la décision interactive exploitant les principes de filtrage ou de propagation de contraintes. Notre objectif se décline alors en l'accompagnement des concepteurs dans la construction des solutions répondant au mieux à leurs problèmes, en retirant progressivement de l'espace des solutions, celles qui ne sont plus cohérentes avec les décisions prises, en estimant celles-ci au fil de leur construction et/ou en les optimisant.

en complément, nous associons à ce formalisme à base de contraintes *CSP* :

- des ontologies pour structurer les connaissances et faciliter leur réutilisation sur l'ensemble du cycle de développement,
- des approches par analogie exploitant de la connaissance contextuelle encapsulée dans des cas afin de proposer à l'utilisateur des recommandations quant aux choix de valeurs,
- des approches évolutionnaires pour optimiser la recherche des solutions de manière multicritère.

Mots-clés : Configuration, *CSP*, Filtrage, Optimisation, CBR, Ontologie

Interactive Configuration and Constraints : Knowledge, Filtering Methods and Extensions

The value of our research work is rooted in the following observations :

- the life cycle of products, systems, services and processes is tending to get shorter,
- new designs and updates of products on the market are becoming more and more frequent, leading to increasingly short design cycles,
- technologies are constantly changing, requiring permanent, ongoing acquisition of knowledge,
- the diversity of products offered on the market is growing all the time, ranging from customizable or configurable to made-to-measure or designed to order.

These trends, and the mass of information and knowledge that requires treating as a result of them, are placing heavy demands on designers, requiring ever more attentiveness and increasingly intense cognitive effort. The result is an increased risk that the product does not fully meet the customer's needs, that it is difficult to implement or manufacture, or that it will be prohibitively expensive. The aim of our work is thus to help the design process to reduce these risks and errors by delivering software tools and methodological environments that serve to capitalize and exploit general, contextual, academic, expert or business knowledge.

Our work on various complex industrial cases has led us to take into consideration two kinds of knowledge, involving on the one hand the "product domain" and on the other the "product diversity element". Each kind of knowledge leads to differing industrial cases :

- the first kind of knowledge encompasses the scientific and technical aspects, but also the specific rules governing the business in question. This knowledge is required in order to define the product itself, and involves issues that can be resolved by aiding the product /system/service design,
- the second kind of knowledge relates to the diverse nature of the products, and involves issues of customization or configuration of the product/system/service.

Our aim is to help in what might be called "routine" design, where different kinds and various types of knowledge exist, due to the recurrent nature of the activity. We consider that aid in design or configuration can be formalized, either completely or partially, in the form of a constraint satisfaction problem (CSP). In this context, we focus more specifically on interactive decision-support, by introducing the principles of filtering or constraint propagation. The diversity of knowledge formalized as a CSP and the interaction with the user allow us to assemble and adapt filtering algorithms in a generic constraint propagation engine, integrated in our CoFiADe software solution.

In addition, this formalism based on CSP constraints is complemented by :

- ontologies to structure knowledge and facilitate its reuse throughout the development cycle,
- analogy-based approaches taking advantage of contextual knowledge encapsulated in the case under study, so as to make recommendations to the user on the choice of values,
- evolutionary approaches to optimize the search for multi-criteria solutions.

Keywords : Configuration, CSP, Optimisation, CBR, Ontology