

Approche par contraintes pour la conception de systèmes automatisés de production à base de composants préfabriqués

Pierre-Alain YVARS¹, Yvon DEGRE¹

¹Institut Supérieur de Mécanique de Paris (SupMeca), LISMMA
3 rue Fernand Hainaut, 93407 Saint Ouen Cedex, France.
payvars@supmeca.fr, Yvon.Degre@supmeca.fr

Résumé— Dans un premier temps, nous proposons dans cet article un méta-modèle permettant d'intégrer les données de la mécanique aux données de l'automatisme en vue de pouvoir représenter les éléments de la partie opérative et de la partie commande d'un système automatisé de production (SAP). Dans un second temps, nous détaillons les principes d'un système d'interrogation de base de données de composants basé sur l'analyse par intervalle et la propagation de contraintes permettant un filtrage efficace de composants préfabriqués instanciés sur catalogue en vue de la satisfaction d'un cahier des charges dans le cadre de la conception d'un élément de SAP. Enfin notre approche est illustrée sur le choix de composants préfabriqués en vue de la réalisation d'un système de positionnement de type rail motorisé.

Mots-clés— CSP, calcul par intervalle, propagation de contraintes, système automatisé de production, composant préfabriqué, conception, méta modèle de données.

I. INTRODUCTION

Un système est un ensemble d'éléments en interaction organisé dans un environnement avec lequel il interagit pour réaliser une fonction qui lui est attribuée [1]. Plus précisément, un Système Automatisé de Production (SAP) est constitué de deux parties essentielles :

- La partie commande (PC) : qui assure l'envoi des ordres vers la partie opérative et permet la communication avec l'opérateur.
- La partie opérative (PO) : qui transforme d'une part à partir des ordres envoyés par la PC, la matière d'oeuvre en lui additionnant une valeur ajoutée, et d'autre part renvoie un compte-rendu à la PC.

La problématique que nous adressons dans ce papier est celle de la conception d'éléments de SAP (partie opérative et/ou partie commande) à base de composants préfabriqués disponibles sur catalogue.

Dans un premier temps nous présenterons le modèle de données PTGAE permettant l'intégration des données de la mécanique dans le poste du génie automatique en vue de pouvoir représenter les éléments de la partie opérative et de la partie commande d'un SAP. Nous proposons ensuite un système de sélection de composants admissibles dans une base de données de catalogue basé sur le calcul par intervalle. Un cas d'étude concernant la conception de système de positionnement à base de rail motorisé est enfin présenté.

II. MODELE ETENDU DES DONNEES DU GENIE AUTOMATIQUE

A. Objectif

L'objectif poursuivi par le modèle du Poste de Travail du Génie Automatique Etendu (PTGAE) est l'intégration des données de la mécanique et du génie automatique au sein d'un modèle unifié de manière à pouvoir représenter l'ensemble des parties commande et opérative d'un système automatisé de production (cf figure 1).

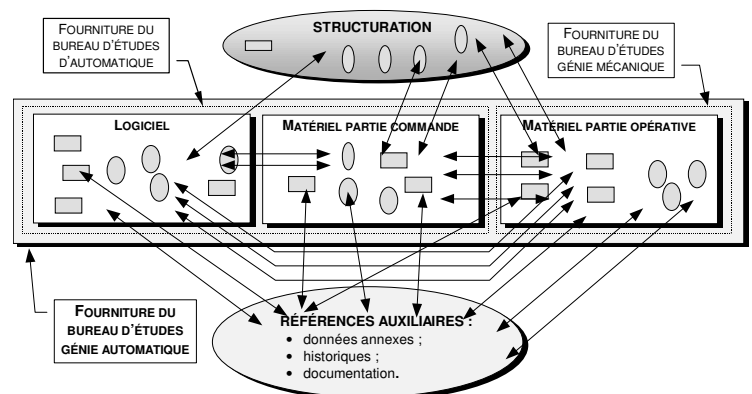


Fig. 1. structure générale du modèle PTGAE

B. Origines

La démarche ayant abouti au modèle PTGAE [2] a consisté à faire la synthèse de deux tendances complémentaires:

- L'approche initiée dans le cadre du projet Base PTA (Poste de Travail de l'Automaticien) pour la représentation des parties commandes des systèmes automatisés de production [3]. Base PTA est une norme (NFZ68-901-1996) et propose un cadre général pour décrire les données manipulées par les outils d'aide assistée par ordinateur sous la forme d'un modèle conceptuel : le modèle Base-PTA. Quatre principes régissent Base-PTA :

- Le concept de « composant implanté » et de « liaison implantée ».
- Le partage et mise en commun de l'ensemble des données pour permettre l'intégration de tous les métiers du génie automatique.
- La représentation des données à l'aide d'un outil « entité-relation ».
- La description d'un système réel (physique) dans son état achevé.

- L'approche du projet KoMoD (KnOWledge MOdeling for Design) visant initialement à la représentation de classes de produits mécaniques [4]. KoMoD est un modèle pour la conception routinière en mécanique. KoMoD est basé sur quatre points de base :

- Le concept de classe ou famille de produits.
- La prééminence de la représentation de la technologie (géométrie, dimensions, composition, ..) dans la conception des ensembles ou des pièces.
- La mise en œuvre ou l'utilisation de pièces ou d'ensembles spécifiques à l'application.
- La description ou la mémorisation des solutions possibles et des mécanismes d'instanciation à base de programmation par contraintes et de calcul par intervalle.

C. Le modèle PTGAE

Nous nous proposons de faire émerger une ontologie adaptée au domaine du génie automatique. Les travaux ont été menés selon deux axes principaux:

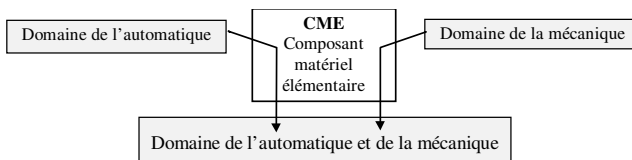


Fig. 2. Le composant élémentaire fédérateur entre les domaines de la mécanique et du génie automatique

- L'intégration des deux domaines de la mécanique et des automatismes par le composant matériel élémentaire (CME) : Comme la structuration de domaine de l'automatisme s'est faite autour du concept de composant préfabriqué implanté, nous poserons que la structuration du domaine de la mécanique se fera également autour de la notion de composant matériel élémentaire (cf figure 2). Le modèle élaboré étend, aux composants de la mécanique la notion de « composant implanté » « liaison implantée » des automatismes afin d'intégrer les composants mécaniques préfabriqués qui sont de plus en plus employés dans la conception actuelle.

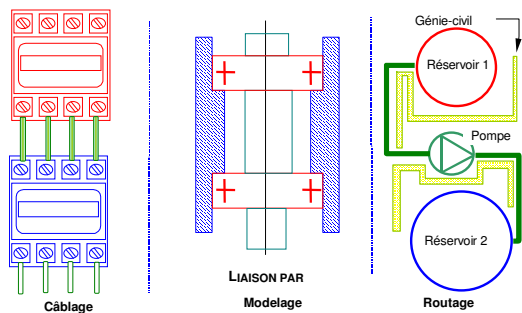


Fig. 3. Placer les composants et les lier par câblage, modelage ou routage

- L'étude et l'approfondissement de la notion de liaison inter composants: Il s'agit ici d'étudier la liaison du génie automatique ainsi que celle de la mécanique de manière à tenter une représentation unifiée. L'analyse de la nature de la liaison inter composants en génie automatique permet de ne retenir que deux types: les éléments de connexions

électriques et les éléments de connexion fluide et cela en faible ou en forte puissance.

La liaison en mécanique est beaucoup plus variée qu'en automatisme et on peut relever plusieurs typologies dans les activités de liaison. Le regroupement des différentes typologies de liaisons du domaine des automatismes étendu à la mécanique est montré à la figure 3.

Sur ces deux bases a émergé le méta modèle PTGAE de la figure 4 représentant les liens entre un Constituant Matériel Élémentaire (CME) et son environnement par le biais de deux types de liaisons : Le Dispositif Élémentaire de Raccordement (DER) et l'Élément Géométrique de Raccordement (EGR). Nous poserons dans la suite de l'étude que tout composant d'un SAP sera représenté sur la base de ce méta modèle.

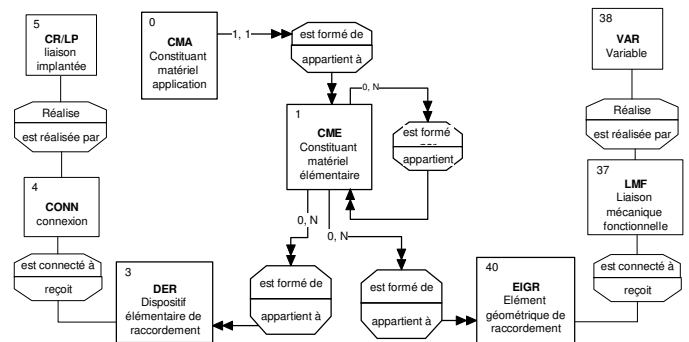


Fig. 4. Métamodèle d'un constituant matériel élémentaire (CME)

III. CALCUL PAR INTERVALLES POUR LA SELECTION DE COMPOSANTS PREFABRIQUES

A. Définition d'un Constraint Satisfaction Problem (CSP)

Un CSP est défini par un triplet (X, D, C) tel que [5]:

- $X = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}$ est un ensemble fini de variables dites variables contraintes. n étant le nombre entier de variables du problème à résoudre.

- $D = \{d_1, d_2, d_3, \dots, d_n\}$ est un ensemble fini de domaines de valeurs des variables de X tel que :

$$\forall i \in \{1, \dots, n\}, x_i \in d_i \quad (1)$$

- $C = \{c_1, c_2, c_3, \dots, c_p\}$ est un ensemble fini de contraintes. p étant un entier quelconque, représentant le nombre de contraintes du problème.

$$\forall i \in \{1, \dots, p\}, \exists X_i \subseteq X / c_i (X_i) \quad (2)$$

Résoudre un CSP revient à instancier chacune des variables de X tout en satisfaisant l'ensemble C des contraintes du problème.

On appelle ici contrainte, n'importe quel type de relation mathématique (linéaire, quadratique, non linéaire, booléenne,...) portant sur les valeurs d'un ensemble de variables.

On trouve dans la littérature plusieurs types de CSP :

- Les CSP discrets : Les variables manipulées sont ici à valeurs dans des domaines finis. Les premiers travaux datent de plus de trente ans [6]. Ces méthodes CSP discrètes, de complexité exponentielle, sont basées sur l'énumération et le filtrage. Ce filtrage, appelé propagation des contraintes, permet de réduire les domaines de définition des variables au fur et à mesure de la résolution. Les CSP discrets ont été

utilisés industriellement pour aider à la résolution de problèmes fortement combinatoires notamment NP difficiles ou NP complets en ordonnancement et logistique [7].

- Les CSP continus : Pour dépasser la limitation de ces CSP à variables discrètes, on a développé des CSP avec des domaines à variables continues à valeur dans des intervalles réels. Cette technique de résolution par intervalles est une synthèse entre l'analyse par intervalles de [8] et les CSP [9]. Plusieurs techniques ont été développées et on en trouvera une présentation par exemple dans [10]. Ce sont ces derniers CSP qui vont nous intéresser dans le cadre de notre étude.

Des applications en conception de produits et de systèmes sont données par exemple dans [11, 12, 13, 14] ainsi que dans le domaine de la configuration [15].

B. Calcul par intervalle pour la résolution d'un CSP numérique

Nous présentons ici les principes de base pour la résolution d'un CSP sur des variables de type intervalles de réels encore appelés CSP numérique ou CSP continu.

Définition 1 : un *intervalle* est un ensemble fermé et connexe de \mathbb{R} . L'intersection d'un nombre fini ou infini d'intervalles est un intervalle.

Une arithmétique spécifique aux intervalles a été mise au point par Moore [5] dans le cadre de la modélisation d'imprécision et d'incertitude ; elle donne les règles de calcul arithmétique entre des variables de type intervalle d'où son nom. Elle fournit un support de base pour la résolution de CSPs numériques.

Définition 2 : On appelle *pavé* $[x]$ de \mathbb{R}^n le produit cartésien de n intervalles.

Définition 3 : On appelle *contrainte* tout type de relation mathématique entre variables. Dans le cas du calcul par intervalles les variables seront des intervalles. Ainsi, une fonction mathématique se calcule sur des valeurs alors qu'une contrainte opère sur des intervalles.

Définition 4 : Un opérateur $C_X: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ est un *contracteur* pour l'ensemble $X \subset \mathbb{R}^n$ si et seulement si :

$$\forall [x] \in \mathbb{R}^n, C_X([x]) \subset [x] \wedge C_X([x]) \cap X = [x] \cap X \quad (3)$$

Pour devenir opérative, toute contrainte d'un CSP continu sera implémentée sous forme d'un contracteur. Ainsi des contracteurs ont été définis pour les opérateurs arithmétiques usuels mais aussi pour des opérateurs quadratiques, puissances et racines, trigonométriques ...

Définition 5 : On appelle *propagation de contraintes*, l'opération qui consiste à appliquer récursivement l'ensemble des contracteurs d'un problème de manière à procéder à une réduction exhaustive des intervalles.

Nous illustrons ce principe à l'aide des deux exemples ci-dessous :

Exemple 1 : Soit le CSP continu suivant :

$$x \in [0, 20] \quad (4)$$

$$y \in [-20, 20] \quad (5)$$

$$(C_1): x - y = 0 \quad (6)$$

$$(C_2): x + 2 \times y = 3 \quad (7)$$

En déclenchant une propagation de contraintes on obtient le processus ci-dessous :

$$(C_1) \Rightarrow y \in [0, 20] \quad (8)$$

$$(C_2) \Rightarrow x \in [0, 20] \cap (3 - 2 \times [0, 20]), \\ x \in [0, 20] \cap ([-37, 0]), x = 0 \quad (9)$$

$$(C_2) \Rightarrow y \in [0, 20] \cap \left(3 - \frac{0}{2}\right), y = 3 \quad (10)$$

$$(C_1) \Rightarrow x \in \{3\} \cap \{0\} = \{\} \quad (11)$$

Ce qui prouve la non solution de ce système de deux contraintes car le domaine des valeurs possibles pour x devient vide dans (55). Le CSP initial est donc inconsistant et n'a pas de solution.

Exemple 2 : Soit le CSP continu suivant :

$$x \in [-15, 15] \quad (12)$$

$$y \in [-15, 15] \quad (13)$$

$$(C_1): y = \sin x \quad (14)$$

$$(C_2): y = x^3 \quad (15)$$

La propagation de contraintes donne :

$$(C_1) \Rightarrow y \in [-15, 15] \cap [-1, 1], y \in [-1, 1] \quad (16)$$

$$(C_2) \Rightarrow x \in [-15, 15] \cap \sqrt[3]{[-1, 1]}, x \in [-1, 1] \quad (17)$$

$$(C_1) \Rightarrow y \in [-1, 1] \cap \sin[-1, 1], y \in [-0.8414, 0.8414] \quad (18)$$

$$(C_2) \Rightarrow x \in [-1, 1] \cap \sqrt[3]{[-0.8414, 0.8414]}, x \in [-0.944, 0.944] \quad (19)$$

Le processus s'arrête et converge au voisinage de ces deux intervalles.

On peut noter au passage qu'un contracteur est acausal. Il n'y a ni intervalle d'entrée ni intervalle de sortie. Tous les intervalles sont contractés tant que cela est possible.

Plusieurs méthodes dites « de consistance » ont raffiné ce principe de propagation de contraintes notamment pour des expressions contraintes à plus que deux variables. Citons pour mémoire la Hull-consistance, la Box-consistance, et la 3B-consistance [16]. En appliquant une technique de propagation de contrainte sur un CSP continu, on obtient un pavé réduit, composé du produit cartésien des intervalles réduits des variables du problème. L'algorithme garantit l'absence de solution à l'extérieur du pavé. S'il existe au moins une solution, elle se trouve à l'intérieur du pavé résultant.

La méthode la plus courante pour résoudre un CSP à domaine continu est d'utiliser un algorithme de type « branch and prune » [16]. Cet algorithme alterne la propagation de contraintes sur intervalles et la décomposition des intervalles jusqu'à ce qu'une précision sur les pavés soit atteinte. Cette

dernière est réalisée par bisection d'un des intervalles (découpe de l'espace des variables en deux sous espaces délimités par un hyper plan passant par le centre d'un des intervalles et orthogonal à sa direction).

C. Interrogation par contrainte d'une base de données de composants préfabriqués en vue de concevoir des éléments de SAP

Nous proposons d'utiliser la propagation de contrainte sur les intervalles pour filtrer dans une base de données de composants, les instances nécessaires à la réalisation d'un élément de SAP de manière à satisfaire un cahier des charges exprimé sous la forme d'un ensemble de contraintes. Il s'agit donc de résoudre un CSP mixte puisqu'une partie des informations sont représentées sous la forme d'un ensemble de combinaison dénombrable (les enregistrements de la base) et une autre sous forme d'intervalles de valeurs possibles des variables.

Nous proposons de représenter les données du modèle PTGAE sous forme d'un ensemble de tables. Chaque table sera considérée comme un tableau contraint. Il s'agit d'une contrainte dite globale représentant les combinaisons possibles de valeurs pour un ensemble de variables contraintes. Chaque ligne d'un tableau contraint est considérée comme un n-uplet de valeurs consistantes. Par exemple, avec la table 1, si la valeur de x_1 doit être plus grande que 10 et que x_3 doit être différent de 2 alors, les lignes 1, 2 et 4 sont automatiquement enlevées de la table par propagation de contraintes. Seules les lignes numéro 3, 5 et 6 resteront dans le tableau contraint.

TABLE I
EXEMPLE DE TABLEAU CONTRAINT

	x_1	x_2	x_3	x_4
1	5	2.1	5	0.1
2	8	1.5	4	0.3
3	10	5.3	3	0.2
4	12	4.8	2	0.5
5	14	2.9	1	0.4
6	15	1.5	10	0.1

Soit le cahier des charges suivant :

$$x_1 \in [5, 15] \quad (20)$$

$$x_2 \in [1.5, 5.3] \quad (21)$$

$$x_3 \in [1, 10] \quad (22)$$

$$x_4 \in [0.1, 0.5] \quad (23)$$

$$x_1 + x_2 > 10.5 \quad (24)$$

$$x_3 \neq 1 \quad (25)$$

Satisfaire ce cahier des charges revient à résoudre un CSP numérique dont les quadruplets (x_1, x_2, x_3, x_4) solutions sont : $(10, 5.3, 3, 0.2)$, $(12, 4.8, 2, 0.5)$ et $(15, 1.5, 10, 0.1)$.

Ce principe illustré ici sur un unique tableau contraint peut se généraliser à un nombre quelconque de tableaux. Il est alors possible d'exprimer des relations à satisfaire entre des attributs de tableaux différents (c'est-à-dire dans le cas de la conception de SAP entre attributs de plusieurs composants

préfabriqués). Le système retournera alors les combinaisons de composants instanciés solutions en nombre fini.

IV. CAS APPLICATIF

A. Présentation du rail motorisé

Les systèmes de rail motorisé permettent le contrôle des parties mobiles de machines automatisées. On voit figures 5 et 6 qu'il s'agit de faire effectuer à un plateau mobile monté sur galets un mouvement rectiligne le long d'un rail fixé sur un bâti machine. Ce mouvement est actionné par un moteur linéaire triphasé (figure 7). Nous nous inspirons dans la suite de cette partie des systèmes et moteurs développés par la société ETEL, qui comptent parmi les références mondiales du domaine. Les différents éléments composants ce type de système sont disponibles sur catalogue mais également sur mesure.

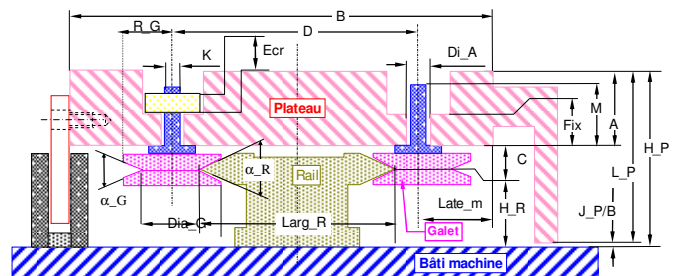


Fig. 5. Paramétrage d'un système de positionnement par rail motorisé – Vue transversale

On se propose d'implanter un moteur linéaire dont la partie mobile sera solidaire du plateau (partie gauche de la figure 5) et la partie fixe à aimant permanent sera fixée au bâti machine.

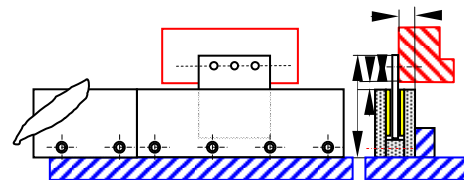


Fig. 6. Implantation moteur – Vue longitudinale

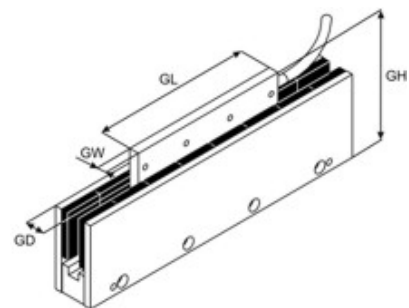


Fig. 7. Moteur linéaire triphasé ETEL

B. Modélisation des données et du cahier des charges de conception

A l'analyse, on constate qu'un système de rail motorisé peut être représenté sous la forme de trois CME : La partie mobile, le rail, le moteur.

La partie mobile est elle-même composée du Plateau et des Galets. Le moteur d'une partie fixe et d'une partie mobile : induit et inducteur.

On dénombre en plus des paramètres globaux : J_{PB}, H_P , dans chaque CME les paramètres ci-dessous :

- Paramètres rail : $Larg_R, \alpha_R, H_R$
- Paramètres galet : Dia_G, α_G, K, Ecr
- Paramètres plateau : $D, C, A, M, Fix, e_m, Di_A, L_P$
- Paramètres moteur : GD, GW, GL, GH, L

Dans le but d'illustrer le principe de notre proposition, nous nous limitons volontairement dans cet article à l'expression des différentes contraintes géométriques à satisfaire pour rendre admissible le montage. L'étude complète devrait bien entendu prendre en compte les contraintes de fixation du moteur sur le bâti et le plateau ainsi que les contraintes énergétiques du cahier des charges (vitesse à atteindre, effort à transmettre ...).

$$D = Larg_R + Dia_G \quad (26)$$

$$H_P = H_R + C + A \quad (27)$$

$$B = Larg_R + Dia_G + 2Late_m \quad (28)$$

$$Fix + Ecr \leq M \quad (29)$$

$$\alpha_G = \alpha_R \quad (30)$$

$$K = Di_A \quad (31)$$

$$A - Fix \geq Ecr \quad (32)$$

$$J_{PB} = H_P - L_P \quad (33)$$

$$GH > H_P - A \quad (34)$$

$$GH < H_P \quad (35)$$

$$B - GD > Late_m - R_G \quad (36)$$

Cet ensemble de relation définit un CSP à résoudre sur les différentes tables de valeur des paramètres du montage (Table des plateaux, galets, rails et moteurs linéaires disponibles en catalogue).

C. Résultats

Un prototype logiciel a été réalisé en C++ à l'aide de la librairie de programmation par contraintes IlogCP [17]. Les tables de valeurs possibles pour les paramètres des plateaux, galets, rails et moteurs linéaires ont été implémentées en tant que contrainte globale de type tableau contraint.

Compte tenu de spécifications initiales, le logiciel permet de générer l'ensemble des configurations catalogues possibles (rail, galet, plateau, moteur linéaire). En cas d'impossibilité, le système propose un dimensionnement sur mesure.

V. CONCLUSION

Nous avons proposé dans ce papier un prototype de système permettant la conception d'éléments de SAP à base de composants préfabriqués. Notre approche est basée sur les techniques d'analyse par intervalle et de propagation de contraintes. Compte tenu d'un cahier des charges donné exprimé sous la forme d'un jeu de contraintes et d'une base de données de catalogues de composants, architecturée selon le modèle de données PTGAE et implémentée sous la forme de tableaux contraints, nous générons l'ensemble des combinaisons de composants admissibles. Enfin, nous avons illustré nos idées sur un cas de conception de rail motorisé. Notre approche gagnerait à être évaluée sur des bases de composants plus volumineuses associées à divers cahiers des charges de systèmes. A titre de perspective, nous pensons également que notre proposition pourrait être étendue à des composants à la fois matériels et logiciels.

REFERENCES

- [1] Le Moigne J.L. *La modélisation des systèmes complexes*, Dunod, Paris, 1995.
- [2] Degré Y. Intégration des données de la mécanique aux données de l'automatique : Une contribution au poste de travail du génie automatique. Thèse de doctorat de l'ENSAM, 24 avril 2001.
- [3] NFZ68-901. *Représentation des systèmes de contrôle et de commande de systèmes automatisés de production*, AFNOR, Paris, 1996.
- [4] Yvars, P.A. Contribution à la représentation des connaissances en ingénierie intégrée de produits et de systèmes de production, Mémoire d'habilitation à diriger les recherches, INPG, Grenoble, janvier 2001.
- [5] Tsang E. *Foundations of Constraint Satisfaction*, Academic Press London and San Diego, 1993.
- [6] Macworth A.K. Consistency in networks of relations, *Artificial Intelligence*, 8(1), pp99-118, 1977.
- [7] Garrido A., Onaindia E., Sapon O. Planning and scheduling in an e-learning environment. A constraint-programming-based approach, *Engineering Application of Artificial Intelligence*, 21(5), pp733-743.
- [8] Moore R.E. *Interval Analysis*, Prentice-Hall, New Jersey, 1966.
- [9] Lhomme O. Consistency Techniques for Numeric CSPs, 13th International Conference on Artificial Intelligence, pp232-238, Chambéry, France, 1993.
- [10] Benhamou F., Granvilliers L. Continuous and Interval Constraints. *Handbook of Constraint Programming*. Chapter 16, pp 571-604, 2006.
- [11] Vargas, C., Saucier, A., Albert, P., Yvars, P.A. Knowledge Modelisation and Constraint Propagation in a Computer Aided Design System, Workshop notes Constraint Processing in CAD of the Third International Conference on Artificial Intelligence in Design, Lausanne, Switzerland, August 1994.
- [12] Yannou, B., Harmel, G. Use of Constraint Programming for Design, *Advances in Design*, ElMaraghy H., ElMaraghy W. Editors, Springer, 2005.
- [13] Chenouard, R., Sebastian, P., Granvilliers, L., Solving an Air Conditioning Problem in an Embodiment Design Context using Constraint Satisfaction Techniques, CP'2007, 13th International Conference on Principles and Practice of Constraint Programming, 2007.
- [14] Yvars, P.A. Using Constraint Satisfaction for designing Mechanical systems, *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, Vol.2, n° 3, August 2008.
- [15] Aldanondo M., Hadj-Hamou K., Lamothe J. (2003). Product generic modelling for configuration : Requirement analysis and modelling elements, Kogan Page, p.50-70, ISBN 1-9039-9643-0.
- [16] H Batmini, Contraintes Globales et Heuristiques de Recherche pour les CSPs Continus, thèse de doctorat en informatique, Université de Nice, 2002.
- [17] *IlogCP : Reference Manual V6.6*, Ilog, 2007.