

Modélisation et optimisation en conception multi-objectifs

J. PAILHES^a, A. COLLIGNAN^b, P. SEBASTIAN^b, T. QUIRANTE^b

a. Arts et Métiers ParisTech, Esplanade d'Arts et Métiers, 33405 TALENCE (France)

b. Université Bordeaux I, 351 cours de la Libération, 33405 Talence (France)

Résumé :

Les problèmes de modélisation et d'optimisation en conception sont caractérisés par des spécificités propres à l'activité de conception : modélisation de connaissances subjectives, optimisation multi-objectifs, problèmes hybrides (continu et discret), taille de l'espace de conception. Cet article propose d'aborder différentes techniques pour modéliser et résoudre ce type de problème. Une méthodologie dénommée OIA (Observation, Interprétation, Agrégation) est proposée pour modéliser la connaissance subjective et objective afin de prendre en compte les préférences du concepteur au cours d'une optimisation multi-objectif en conception.

Abstract :

The modeling and optimization design problems are characterized by specific features of design activity : subjective knowledge modeling, multi-objective optimization problems hybrid (discrete and continuous), size of the solution space. This article proposes to examine various techniques for modeling and solving such problems. The methodology OIA (Observation, Interpretation and Aggregation) is presented. This method models objective and subjective knowledge to take into account preference. This method is applied for a multi-objective design problem.

Mots clefs : Optimisation, Conception multi-objectif, Elasticité, Espace de conception

1 Introduction

Le processus de conception préliminaire doit permettre de prendre en compte dès les premières phases de conception les différents points de vue de l'ensemble des acteurs présents tout au long du cycle de vie du produit. Ces connaissances peuvent être de différentes natures, formalisées ou non, objectives ou subjectives [1], le fruit de règles métiers, de différentes simulations à des échelles de description très variées, de prototypes expérimentaux ou de retour d'expérience de projets antérieurs. Le développement de nouveaux produits étant toujours très contraint par les délais de développement, il est nécessaire de mettre en œuvre des méthodologies performantes qui permettent de traiter des données hétérogènes, avec des critères d'appréciation nombreux et variés dans un délai relativement court. En ce sens, les problèmes de conception préliminaire sont présentés comme des problèmes d'optimisation multi-objectifs [2]. Il est important de noter que ce type de problème n'est pas compatible avec les techniques d'optimisation mathématiques classiques. En effet, de telles méthodes requièrent de pouvoir calculer en tout point les dérivées de la fonction considérée. Or dans les problèmes de conception, généralement, de nombreux éléments possèdent un caractère discret et discontinu. La fonction objectif n'est donc pas toujours dérivable. Par exemple, une variable de conception peut être une référence dans un catalogue d'éléments standard, dans ce cas là, la notion de dérivée n'a pas de sens mathématique et ne peut être définie.

Des méthodes d'analyse multicritères classiques existent, elles utilisent des notes affectées à des solutions candidates par rapport à des critères, et sont agrégées à partir d'une pondération. La grande difficulté d'utilisation de ces méthodes réside dans la génération de solutions candidates qui se fait a priori, et est incompatible avec des espaces de solutions de grande dimension comme on en rencontre en conception de produits.

Nous proposons une méthodologie OIA (Observation, Interprétation, Agrégation) comme processus de modélisation et de formalisation du comportement du produit et des préférences du concepteur associée à un

algorithme d'optimisation. Plusieurs types de préférences peuvent être exprimés comme la performance, la confiance et la robustesse. La méthode OIA se découpe en trois modèles, comme représenté sur la Figure 1. Le modèle d'observation correspond à la modélisation du comportement du produit. Le modèle d'interprétation vise à qualifier chaque variable d'observation du modèle. Enfin, le modèle d'agrégation permet de réduire les différentes variables d'interprétation à un indicateur unique qui permet de comparer les solutions.

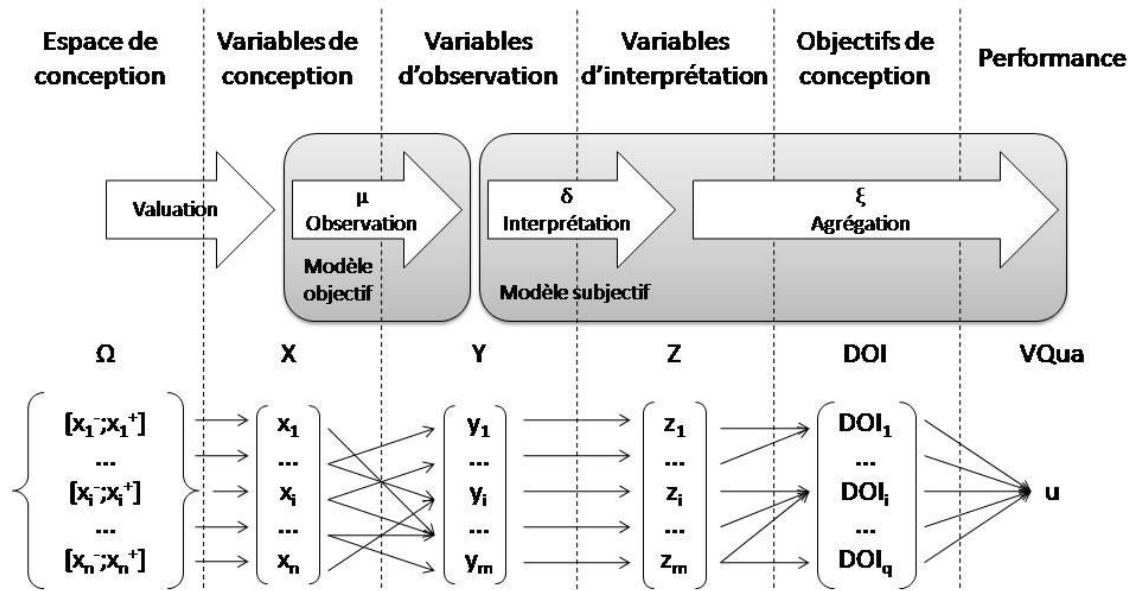


FIG. 1 –Processus de la méthode OIA (Observation, Interprétation, Agrégation)[1]

2 Espace de conception

Le produit à concevoir est défini par un vecteur X contenant l'ensemble des variables de conception (VCo) qui permettent de définir de manière univoque une solution technique candidate par instanciation de ces variables. Chaque variable de conception est choisie à l'intérieur d'un domaine de valeur. L'ensemble de ces domaines de valeurs définit l'espace de conception Ω , dans lequel chaque point est une solution candidate. La problématique de l'optimisation multi objectif en conception est de définir des solutions candidates appartenant à l'espace de conception et répondant de la manière la plus pertinente possible à différents critères établis par le concepteur. Pour des problèmes classiques, l'espace de conception peut être vaste, le nombre de variables pouvant atteindre plusieurs centaines de variables [3]. Il est donc indispensable de mettre en œuvre des procédures permettant de réduire leur nombre tout en respectant la nature du problème posé.

Un autre problème dans l'exploration de l'espace de conception est la discrimination des solutions candidates. En effet, deux solutions ayant au moins une composante distante de ε (avec ε supérieur à la précision machine) correspondent à deux solutions différentes au sens mathématique. Pour un concepteur, la prise en compte du sens physique de la variable oblige à une interprétation qui fait que deux solutions différentes doivent être distantes d'une valeur significative du point de vue physique [1]. Il est donc amené à définir des intervalles à l'intérieur desquels une seule instanciation de la variable doit être considérée. Il faut ainsi être capable de pouvoir discriminer les solutions avant ou après le processus d'optimisation. Une manière relativement simple d'éviter ce problème est de transformer les variables de conception continues en variables discrètes a priori, mais un risque apparaît alors d'éviter un certain nombre de solutions non proposées par la discrimination. Ce phénomène n'est généralement pas un inconvénient pour les concepteurs car il est préférable que les solutions retenues appartiennent à des zones de solutions peu sensibles à la variabilité des VCo (notion de robustesse).

L'étendue de l'espace de conception étant importante, les concepteurs souhaitent généralement n'explorer que des zones particulières qui correspondent à des zones privilégiées propres à leurs objectifs d'optimisation, proches de solutions de référence. La prise en compte de ces préférences durant le processus d'optimisation est primordiale pour réduire les temps de calcul et converger rapidement vers des solutions pertinentes. Il est par exemple possible de réduire l'espace de conception en réduisant les domaines de valeurs, afin de biaiser la convergence. Collignan propose de procéder ainsi en faisant croître l'espace de

conception au cours de l'optimisation, afin de trouver une solution de conception satisfaisant plusieurs contraintes portant sur les VCo [1].

3 Modélisation objective

Lors du processus de conception, différents types de connaissances doivent être prises en compte afin d'optimiser la recherche de solutions. Les scientifiques ont l'habitude de modéliser ces connaissances sous forme mathématique. Les procédures de modélisation combinent à la fois des modèles objectifs, issus directement de l'analyse de phénomènes physiques et de comportements complexes du produit, et des préférences du concepteur plus ou moins complètes, qui peuvent dans certains cas, difficilement se traduire sous forme analytique. Nous nommons ce type de modélisation "modèle subjectif" (Figure 1).

Dans le cas de la modélisation objective, le choix des variables de conception permet, au travers de modèles, de calculer des variables d'observation (VObs) notées dans un vecteur Y . Ces modèles peuvent être de d'origines diverses, par exemple issus de comportements multi-physiques, de modèles économiques [4] ou environnementaux [5], de modèles de comportement utilisateur [6] ou autre. La difficulté ici réside dans le fait que le modèle d'observation est très hétérogène : il est exprimé au moyen d'équations, d'inéquations, de règles logiques, de variables, de plusieurs outils de simulation, de bases de données et de contraintes à respecter. Les outils et méthodologies à mettre en œuvre dans cette partie doivent permettre de gérer des informations hétérogènes. Les variables de conception peuvent être continues (dimensions, débits...) ou discrètes (référence matériaux, types d'éléments standards...). Les variables d'observation peuvent être en très grand nombre. Si l'on considère des simulations par éléments finis et leur post-traitement dans le processus d'optimisation, le nombre de variables d'observation peut dépasser le millier de variables. Comme pour l'espace de conception, le nombre de variables d'observation doit être réduit. Deux pistes sont possibles pour atteindre cet objectif, soit une procédure efficace, de type surface de réponse par exemple, permet de réduire le nombre de variables après simulation de la connaissance objective, soit la modélisation objective fait appel à des modèles extrêmement parcimonieux (au sens du PEPS [7]) qui vont générer peu de variables d'observation. Dans ce cas, des travaux ont proposé de gérer cette activité à partir d'un acronyme : PEPS. Ils proposent de qualifier les modèles à travers quatre de leurs caractéristiques, que sont la Précision, l'Exactitude, la Parcimonie et la Spécialisation [7]. Ces indicateurs permettent de maîtriser la difficulté de mise en œuvre des modèles et leur qualité à simuler les comportements souhaités.

4 Modélisation subjective

Deux possibilités sont envisageables pour introduire la connaissance subjective dans le modèle global de conception. Soit les modélisations et décisions sont réalisées *a priori* afin de formaliser les préférences utilisateur tôt dans le processus de conception, soit elles sont réalisées *a posteriori* [8].

Dans le premier cas, l'optimisation multi-objectif est réalisée en utilisant un modèle d'agrégation plus ou moins complexe qui permet de transformer le problème préalablement en une optimisation mono-objectif. Afin de prendre en compte les préférences utilisateur, le concepteur doit définir un modèle de préférences (modèle d'interprétation) qui est intégré dès les phases de recherche de l'optimum. L'intérêt de cette technique est de converger vers un optimum unique.

Dans le second cas, le processus est inversé, l'optimisation est réalisée en utilisant plusieurs critères, puis une recherche d'optimum est effectuée au sein de l'ensemble des solutions candidates sélectionnées par le processus d'optimisation. Les préférences s'expriment alors dans un deuxième temps au moment du choix dans parmi les solutions candidates. L'exemple typique est la constitution et l'utilisation du front de Pareto pour l'aide à la décision. Ce type de techniques nécessite de pouvoir exploiter correctement l'ensemble des solutions candidates, or dans des problèmes avec un grand nombre de variables de conception il est souvent difficile d'interpréter correctement des solutions représentées via un grand nombre de critères. On peut imaginer que les outils de la réalité virtuelle vont à terme permettre de faciliter cette tâche.

Par la suite, nous présentons quelques exemples de modélisations subjectives *a priori*, représentatifs de l'activité de conception.

4.1 Modèle d'interprétation

La recherche de solutions pertinentes est toujours réalisée dans un contexte particulier, propre au domaine d'activité et aux retours d'expériences des acteurs du processus de conception. Dans ce registre, un ensemble de critères sont généralement appliqués, et permettent de prendre en compte des partis-pris qui sont définis

par une stratégie d'entreprise. Ces règles peuvent évoluer en fonction du contexte du projet, par exemple économique ou environnemental.

Après avoir obtenu un ensemble de variables d'observation, le concepteur doit pouvoir les interpréter afin de focaliser sa recherche sur les zones pertinentes de l'espace de conception. Cette interprétation fait appel à des préférences qui dérivent du savoir faire et de l'expérience du concepteur. Cette connaissance n'est pas formalisée dans le modèle de comportement. Le concepteur est capable de savoir quelles valeurs sont acceptables ou pas et de nuancer une zone de transition entre les deux, et ceci pour chaque variable. Ces préférences peuvent être traduites par l'utilisation de fonctions de désirabilité dans le cas de la formalisation de la performance. Ce principe a été introduit par Harrington dans le domaine de la qualité [9]. Pour chaque variable d'observation y_i , une fonction de désirabilité d_i peut être associée afin d'adimensionner chacune des réponses et discriminer les valeurs acceptables des valeurs à rejeter au travers des préférences du concepteur ainsi formalisées. Classiquement, les valeurs des fonctions de désirabilité sont comprises entre 0 et 1. Il est alors possible de comparer les variables résultantes, dites "d'interprétation" (VInt), notées Z , issues des fonctions de désirabilité.

4.2 Modèle d'agrégation

Le nombre de variables d'interprétation génère une grande difficulté pour la recherche de solutions optimales. Une méthode d'agrégation s'avère indispensable pour contourner cet écueil. Il existe plusieurs types de méthodes d'agrégation, agrégation par une moyenne arithmétique, agrégation par une moyenne géométrique [10], agrégation par le minimum. Antonsson a proposé un continuum pour relier l'ensemble de ces critères d'agrégation [11]. Il explique que l'agrégation par une moyenne arithmétique a peu d'intérêt pour les concepteurs car elle ne permet pas de mettre en exergue le rejet de solutions dont les variables d'interprétation sont nulles (principe d'annihilation). Les deux dernières techniques d'agrégation sont donc à privilégier dans le cadre de conception de produit.

L'utilisation d'une fonction d'agrégation unique risque de générer une interprétation globale des variables d'interprétation, qui n'aurait pas réellement de sens pour les concepteurs. L'idée de la solution idéale est en totale contradiction avec l'activité de conception où plusieurs solutions candidates doivent pouvoir être discriminées en fonction de plusieurs indicateurs correspondant à des objectifs de conception. Un décideur doit pouvoir choisir une solution parmi plusieurs alternatives qui vont satisfaire de manière plus ou moins convenables plusieurs objectifs de conception. Sébastian a proposé de définir les objectifs de conception à partir de l'analyse fonctionnelle et de la rédaction du cahier des charges fonctionnel. Ainsi il est possible de définir des index pour chaque objectif de conception (DOI : Design Objective Index) [12]. Les objectifs de conception peuvent être des indicateurs de différentes natures comme des indicateurs de coût, de performance énergétique, des indicateurs environnementaux, de masse... Cette méthodologie permet d'extraire un nombre restreint d'éléments, qui ont un réel sens pour les concepteurs, et qui leur sont nécessaires à la prise de décision.

Les différentes méthodes d'agrégation passent toutes par une phase d'introduction de coefficients de pondération. Le choix des coefficients de pondération est très subjectif et pose de nombreux problèmes. Les différentes variables agrégées étant la plupart du temps adimensionnées et comprises entre 0 et 1, la nature de la pondération ne peut avoir qu'un sens relatif et qualitatif. Les limites inférieures et supérieures des coefficients de pondération conditionnent énormément le résultat de l'agrégation. Le rejet de solutions est souvent lié à une ou plusieurs variables possédant des valeurs en dessous de limites admissibles pour le concepteur. Il est possible toutefois d'exprimer les différents DOI en fonction d'une valeur d'échange commune, comme par exemple, la quantité de CO2 produite par rapport à une solution de référence. Dans ce cas il est relativement facile de pouvoir comparer des DOI entre eux. Autre point délicat, la sensibilité de la fonction d'agrégation à des variations des coefficients d'agrégation, en effet, certains coefficients peuvent masquer une réponse pertinente de part le manque de sensibilité de certains coefficients d'agrégation. De plus les DOI ne sont généralement jamais indépendants. Par exemple lors de la conception de systèmes énergétiques la puissance obtenue est généralement liée à la masse globale du système. Ce couplage entre variables implique que le sens que prennent les coefficients de pondération est très différent de celui qu'ils auraient dans le cas d'une agrégation avec des DOI complètement indépendants. Il existe cependant des méthodes qui permettent de déterminer mathématiquement les coefficients de pondération. En utilisant des comparaisons deux à deux, la méthode AHP (Analytic Hierarchy Process) a déjà été utilisée avec succès en conception.

5 Préférences

L'utilisation de différentes préférences de manières statique (arc-élasticité, trade-off...) ou dynamique (contrôle stratégique) relève non pas de l'efficacité mathématique, mais de la volonté et des besoins en conception. Pour ces trois préférences (performance, confiance et robustesse), la procédure pour traiter la génération du modèle est identique : observation, interprétation et agrégation (Figure 2). La performance correspond à l'optimisation « usuelle » (nominale) où seule la capacité à atteindre les objectifs de conception est prise en compte. La confiance qualifie le risque de conception vu par le concepteur. La distance à une solution de référence, qui est connue et éprouvée par l'entreprise participe à cette catégorie de préférence. Enfin la robustesse traduit la sensibilité de la solution de conception à des variations des différentes variables pertinentes du problème. Un concepteur privilégiera toujours des solutions qui restent performantes lorsque l'on s'éloigne des valeurs nominales des variables de conception.

Plus les solutions s'éloignent des produits déjà maîtrisés et fiabilisés, plus le risque de se trouver face à des problèmes techniques nouveaux est grand. Il est proposé de caractériser cette caractéristique via la notion d'arc-élasticité introduite initialement dans le domaine de la micro-économie par Allen [13]. Cette notion permet de qualifier les variations de la demande d'un produit par rapport aux variations de son prix. Elle est utilisée aujourd'hui dans de nombreux domaines.

Collignan [1] a proposé d'employer cette notion en conception de produits, elle traduit un compromis entre la performance et la confiance. En effet, les concepteurs connaissent *a priori* une solution de conception convenable qu'ils cherchent à améliorer. L'arc élasticité permet alors de définir la pertinence de la nouvelle solution en fonction de deux éléments antagonistes que sont l'amélioration de sa performance p et la dégradation de sa confiance c , qui formalise ainsi cette distance.

Ces trois types de préférences ont un sens différent du point de vue du concepteur. La fonction de synthèse doit être construite en introduisant le concepteur dans la boucle d'optimisation. Elle permet au concepteur de discriminer des solutions candidates pertinentes en fonction de ces trois préférences. Il est possible d'utiliser un front de Pareto, les fonctions trade-off ou pour la confiance l'éloignement à une solution de référence par exemple. Une interprétation du sens des différentes combinaisons possibles de préférences privilégiées est présentée au Tableau 1.

La méthode OIA a déjà été appliquée avec un algorithme d'optimisation globale, de type algorithme génétique, sur des cas industriels [1,13]. Par exemple, lors de la conception d'un assemblage riveté pour des pièces structurales en aéronautique, il a été montré qu'il était possible d'améliorer des solutions nominales produites par les bureaux d'études industriels en introduisant la notion d'arc-élasticité. En effet, les concepteurs souhaitant réduire les couts de production, des modifications majeures par rapport à la solution nominale, (comme la remise en cause d'épaisseur) ont été qualifiées avec des confiances faibles car elles présentaient un risque potentiel important. Par contre certaines modifications comme le positionnement des rivets ont fait l'objet de confiances moins pénalisantes. En synthétisant l'ensemble des préférences, il a été montré qu'il était possible d'envisager des réductions de cout importantes en réduisant le nombre de rivets et en modifiant leur implantation au sein de la structure. Les gains sont importants car les temps d'assemblage,

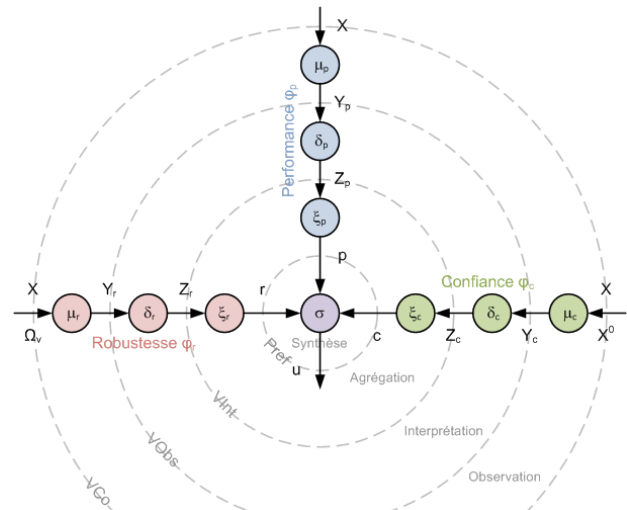


FIG. 2 – Illustration des trois types de préférences à gérer (statiquement ou dynamiquement) au sein d'une fonction de synthèse

les procédures de contrôle et les couts de maintenance s'en trouvent réduits. Suivant le contexte, c'est à dire les confiances et performances attendus, les résultats de l'optimisation sont très différents. L'intérêt ici pour l'industriel est de pouvoir gérer facilement le compromis entre la confiance et la performance avec un outil relativement performant en temps de

p	c	r	Sens du point de vue concepteur pour une recherche d'un maximum
•			Conception <i>usuelle</i> (recherche d'un produit performant)
	•		Reverse engineering
		•	Recherche de solutions robustes sans performances
•	•		Conception <i>Arc-élastique</i>
	•	•	Conception robuste d'une solution de référence
•		•	Conception robuste
•	•	•	Conception <i>Arc élastique</i> et robuste

TAB. 1 – Synthèse des préférences

calcul. Ces méthodologies font l'objet de développements industriels dans le cadre du projet AXSPAD réalisé en collaboration avec plusieurs partenaires du secteur aéronautique.

6 Conclusion

Les choix réalisés par les décideurs sont effectués en fonction d'orientations de conception. Il est donc très important de proposer un modèle qui puisse être le plus fidèle possible aux intentions et priorités des concepteurs. La prise en compte du concepteur au cours du processus de modélisation est primordiale. Chaque problème de conception présente des phases de réduction, interprétation et agrégation de la connaissance qui lui sont propres. Cet article permet de mettre en exergue les différentes difficultés rencontrées lors de problèmes d'optimisation multi-objectifs en conception. La méthode OIA est présentée afin de prendre en compte la connaissance subjective, qui n'est pas toujours exprimée dans les processus usuels d'optimisation. Une analyse experte du comportement du produit, une connaissance fine du contexte et des points de vue de conception sont des éléments clé de la réussite d'une optimisation multi-objectifs en conception. Une application efficace des concepts présentés ici doit permettre de faciliter la tâche du concepteur.

Références

- [1] Collignan A., Sebastian P., Pailhes J., et Ledoux Y., 2010, « Qualification of solutions in mechanical design through the concept of elasticity », *Research in interactive design*, Springer Paris Berlin Heidelberg New York, Bordeaux.
- [2] Saridakis K., et Dentsoras A., 2008, « Soft computing in engineering design - A review », *Advanced Engineering Informatics*, **22**(2), p. 202-221.
- [3] Collignan A., Pailhes J., et Sebastian P., 2011, « Design optimization: management of large solution spaces and optimization algorithm selection », *Improve 2011*, Venice, Italy.
- [4] Duverlie P., et Castelain J. M., 1999, « Cost Estimation During Design Step: Parametric Method versus Case Based Reasoning Method », *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **15**(12), p. 895-906.
- [5] Ho Kon Tiat V., Sebastian P., et Nadeau J.-P., 2008, « Multicriteria-oriented preliminary design of a flash evaporation process for cooling in the wine-making process », *Journal of Food Engineering*, **85**(4), p. 491-508.
- [6] Poirson E., Dépincé P., et Petiot J.-F., 2007, « User-centered design by genetic algorithms: Application to brass musical instrument optimization », *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, **20**(4), p. 511-518.
- [7] Vernat Y., Nadeau J.-P., et Sebastian P., 2010, « Formalisation and qualification of models adapted to preliminary design », *International Journal of Interactive Design and Manufacturing*, **4**(1), p. 11-24.
- [8] Augusto O. B., Rabeau S., Dépincé P., et Bennis F., 2006, « Multi-objective genetic algorithms: A way to improve the convergence rate », *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, **19**(5), p. 501-510.
- [9] Harrington E. C., 1965, « The desirability function », *Industrial Quality Control*, **21**(10), p. 494-498.
- [10] Derringer R., et Suich R., 1980, « Simultaneous optimization of several response variables », *Journal of Quality Technology*, **12**(4), p. 214-219.
- [11] Scott M., et Antonsson E., 1998, « Aggregation functions for engineering design trade-offs », *Fuzzy sets and systems*, **99**(3), p. 253-264.
- [12] Sebastian P., Quirante T., Ho Kon Tiat V., et Ledoux Y., 2010, « Multi-objective optimization of the design of two-stage flash evaporators: Part 2. Multi-objective optimization », *International Journal of Thermal Sciences*, **49**(12), p. 2459-2466.
- [13] Allen R. G. D., et Lerner A. P., 1934, « The Concept of Arc Elasticity of Demand », *The Review of Economic Studies*, **1**(3), p. 226-230.