HAL
open science

Conception de systèmes mécatroniques par optimisation topologique

Didier Casner, Jean Renaud, Dominique Knittel

To cite this version:

Didier Casner, Jean Renaud, Dominique Knittel. Conception de systèmes mécatroniques par optimisation topologique. 12ème colloque national AIP-PRIMECA, Mar 2011, Le Mont Dore, France. pp.AIP Priméca. hal-00843025

HAL Id: hal-00843025

https://hal.science/hal-00843025v1

Submitted on 10 Jul 2013

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

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

CONCEPTION DE SYSTEMES MECATRONIQUES PAR OPTIMISATION TOPOLOGIQUE

Didier Casner, Jean Renaud, Dominique Knittel

Laboratoire de Génie de la Conception, 24 Boulevard de la Victoire 67084 Strasbourg Cedex, 0388144700, {didier.casner, jean.renaud, dominique.knittel}@insa-strasbourg.fr

Résumé:

Dans cet article, nous nous proposons de nous intéresser à la notion de conception optimale de systèmes mécatroniques, c'est-à-dire en employant des méthodes d'optimisation, et plus particulièrement en utilisant l'optimisation topologique, afin de pouvoir déterminer, non pas les paramètres optimaux d'un modèle, comme c'est le cas actuellement, mais directement le modèle optimal.

L'optimisation topologique est basée initialement sur l'analyse par éléments finis et est actuellement utilisée pour l'optimisation de structures ou de formes, autrement dire en mécanique. Il est cependant utile, dans le cas des systèmes couplant plusieurs domaines physiques, comme par exemple les systèmes mécatroniques ou optomécatroniques, de s'intéresser à la possibilité d'étendre l'optimisation topologique à ce type de systèmes.

Dans le cas des systèmes mécatroniques, cette méthodologie a pour principaux objectifs, outre l'optimisation structurelle, de rechercher entre autres la meilleure structure de commande possible (PI, PD, PID, ...) afin d'obtenir le meilleur asservissement, tant du point de vue automatique (stabilité, robustesse, temps de réponse) qu'informatique (temps de calcul de la consigne) et de déterminer le circuit électronique optimal. Cette recherche ayant pour but d'assister le chef de projet pour la conception assistée et optimale de systèmes mécatroniques.

Nous nous proposons ainsi de concevoir un outil d'aide à la conception de systèmes mécatroniques par optimisation topologique multiphysique.

Mots clés: Conception mécatronique, optimisation globale, optimisation topologique

1 Introduction

D'après la norme française NF E 01-010[1], un produit mécatronique doit, comme le montre la figure 1, pouvoir percevoir son milieu environnant, traiter l'information, communiquer et agir sur son milieu, présenter un niveau complet d'intégration mécatronique, autrement dit associant les domaines de la mécanique, l'électronique, l'automatique et l'informatique, du point de vue fonctionnel et physique.

Le processus d'intégration du produit mécatronique est, comme précisé précédemment, un phénomène à deux dimensions[2] : on parle en effet d'intégration fonctionnelle, correspondant au degré d'interaction du dispositif avec les autres dispositifs, et physique, représentant le degré de rapprochement de technologies hétérogènes au sein d'un module.

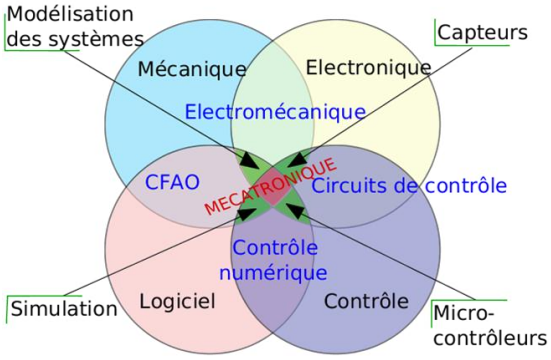


Figure 1. Diagramme de Venn de la mécatronique [3]

Depuis quelques années, on voit apparaître un accroissement de l'interaction fonctionnelle avec l'interaction physique, bien qu'il n'existe pas de corrélation entre ces deux aspects.

L'essor de la mécatronique est cependant très lié avec celui de l'informatique et la miniaturisation des circuits imprimés, qui permettent d'accroitre l'intégration des éléments électroniques dans les corps mécaniques.

Afin d'accroitre cet intégration, des travaux de recherches sont actuellement menés sur la conception optimale, utilisant plus particulièrement l'optimisation multicritère, de systèmes mécatroniques, comme par exemple [4-8], principalement sur des robots. La tendance actuelle allant plus vers une optimisation globale, c'est-à-dire du système complet, qu'une optimisation locale. Cet optimisation reste cependant figée à l'optimisation de paramètres[9] : le système est paramétré par un nombre fini et réduit de variables, ce qui diminue considérablement la variété de systèmes possibles et qui dépend fortement du modèle du système utilisé, puisque l'on n'optimise que ses paramètres.

Depuis le début des années 2000, on commence à voir apparaître une nouvelle méthodologie d'optimisation : l'optimisation topologique, utilisée principalement pour l'optimisation de structures et de formes [9] et basée sur la modélisation éléments finis. Ce type d'optimisation permet de déterminer la meilleure solution possible, sans aucune restriction, quitte à changer le modèle du système.

Dans cet article, nous nous proposons d'étudier la possibilité d'étendre le domaine d'utilisation restreint de l'optimisation topologique aux systèmes couplant plusieurs disciplines physiques, par exemple les systèmes mécatroniques.

Dans un premier temps, nous présenterons brièvement le processus de conception de systèmes ou de produits, avant de nous intéresser plus particulièrement à la conception optimale de systèmes mécatroniques. Enfin, nous évoquerons la thématique principale de cet article en présentant le principe de conception de systèmes mécatroniques en utilisant la thématique de l'optimisation topologique, puis nous l'appliquerons à un système mécatronique simple afin d'illustrer notre démarche.

2 Processus de conception de systèmes

Le processus de conception de systèmes a été, entre autres, formalisé par Pahl et Beitz [10] en 1988 et est depuis très cité dans la littérature. Ce processus peut être divisé en quatre phases distinctes et est présenté figure 2.

La première étape vise à rédiger le cahier des charges qui comprend l'expression du besoin ainsi que la liste des spécifications et contraintes que doivent respecter le produit ou système final. Cela passe notamment par l'analyse du marché et de la situation de l'entreprise, la recherche et la sélection d'idées, la formulation d'une proposition de produit, la clarification de la tâche, ainsi que l'élaboration d'une liste d'exigences et de spécifications de produits.

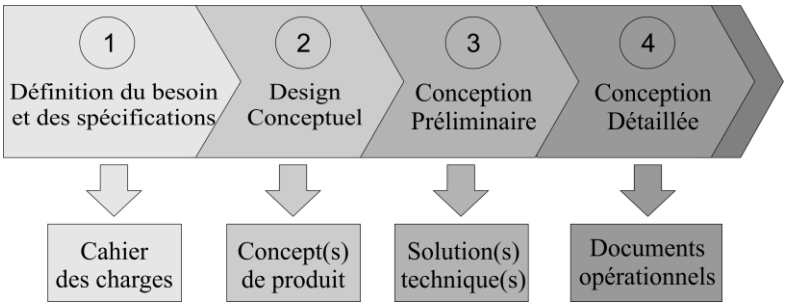


Figure 2. Processus de développement de produits [7,10]

Une fois le cahier rédigé, il convient de définir un concept de produit (étape 2), à savoir une description, compréhensible par les utilisateurs finaux, de la solution proposée sous la forme d'un ensemble d'idées intégrées et de concepts sur ce qu'il doit faire, comment il doit se comporter et à quoi il doit ressembler. Ce concept correspond à une définition en termes simples de la solution principale, notamment en identifiant les problèmes essentiels, établissant les structures, recherchant des principes et des structures de travail, proposant des variantes de concept et en évaluant les variantes et la solution principale par rapport aux critères technologiques et économiques. On obtient alors une représentation simple des principaux choix technologiques et de la structure du système.

A partir de ce concept, il est désormais possible de définir une ou plusieurs solutions technologiques (étape 3), descriptions sous la forme de solutions technologiques répondant au concept choisi à l'étape précédent. Ces solutions doivent permettre de comprendre comment doit être le système, en terme de composants, de formes, de matériaux, … afin qu'il réponde aux exigences exposées dans le cahier des charges, à partir du concept. Dans le cas où l'on définirait plusieurs solutions techniques, il est nécessaire d'ajouter une étape de décision visant à sélectionner la solution la plus adéquate et qui répond le mieux aux attentes de l'utilisateur. C'est pourquoi, il est intéressant d'associer l'utilisateur final, qui a exprimé le besoin, dans ce processus de décision.

Et enfin, l'étape de conception détaillée a pour but de préparer la production et les documents opérationnels, c'est-à-dire élaborer les schémas détaillés et la nomenclature de toutes les pièces nécessaires, donner des instructions complètes concernant la production, l'assemblage, le transport et l'exploitation et vérifier tous les documents.

Une fois cette dernière étape réalisée, on possède tous les éléments nécessaires permettant de fabriquer le produit final.

3 Conception optimale de systèmes mécatroniques

La conception optimale désigne le fait d'employer des méthodes d'optimisation afin de concevoir un produit ou un système.

3.1 Généralités sur l'optimisation multiobjective

L'optimisation est une discipline mathématique ayant pour but la recherche de solutions optimales (maximum ou minimum) d'une ou plusieurs fonctions, appelées fonctions de coût, critères ou objectifs, auxquelles peuvent s'ajouter un certain nombre de contraintes d'égalité ou d'inégalité. Cet ensemble de fonctions est appelé problème d'optimisation. On peut distinguer plusieurs types d'optimisation, suivant le nombre de fonctions entrant en jeu : l'optimisation monocritère, lorsque l'on a un seul objectif, et l'optimisation multicritère, lorsque l'on en a plusieurs.

Suivant le type d'optimisation, on sera amené à utiliser des méthodes de résolution différentes. Dans le cas de l'optimisation multicritère, qui nous intéresse ici, la recherche de solutions se fait au moyen de méthodes itératives ou d'algorithmes. On distingue différents types de méthodes, suivant le degré d'implication du décideur dans le processus d'optimisation, comme présenté figure 3.

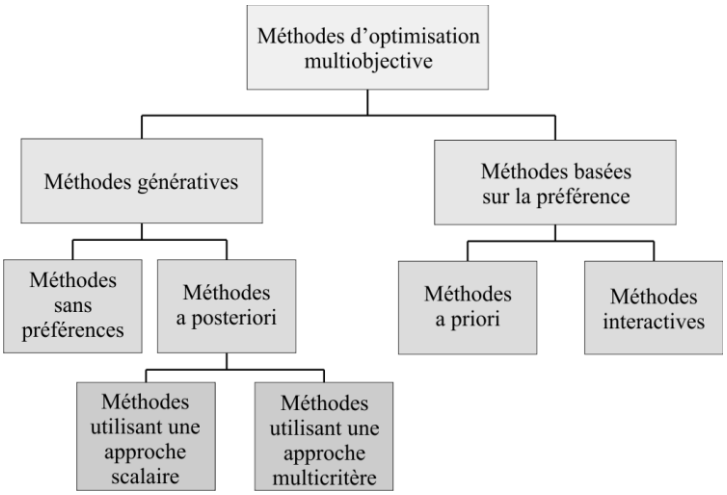


Figure 3. Classification des méthodes d'optimisation multicritère [11]

Les méthodes dites sans préférences sont des méthodes qui ne requièrent pas d'action de la part du décideur. On a alors des critères globaux et la solution est un compromis neutre entre les différents objectifs.

Dans le cas des méthodes a posteriori, elles nécessitent une action après le processus d'optimisation, essentiellement une phase de décision afin de choisir la solution qui sera retenue parmi l'ensemble des solutions. On distingue deux classes de méthodes :

- Celles qui utilisent une approche scalaire : ce sont principalement les méthodes basées sur la recherche des solutions optimales d'une fonction résultant de la pondération des différents critères. Le décideur aura alors pour tâche de déterminer les valeurs des poids à attribuer à chacun des critères. Cette approche a l'avantage de pouvoir ramener un problème d'optimisation multicritère en un problème monocritère, plus facile à résoudre, mais elle ne fonctionne malheureusement que pour des problèmes convexes et linéaires, or la majorité des problèmes rencontrés en conception optimale ne sont ni convexe, ni linéaires.
- La seconde méthode consiste à utiliser une approche multicritère, c'est-à-dire utiliser des algorithmes de résolution spécifiques pour les problèmes multicritères, comme les algorithmes évolutionnaires de type MOGA ou NSGA[12]. Cette approche est plus complexe mais s'avère plus efficace que l'approche scalaire, mais fait apparaître une notion spécifique de front de Pareto, permettant de comparer les différents critères entre eux, et nécessite de faire un compromis entre les différents objectifs [13, 14].

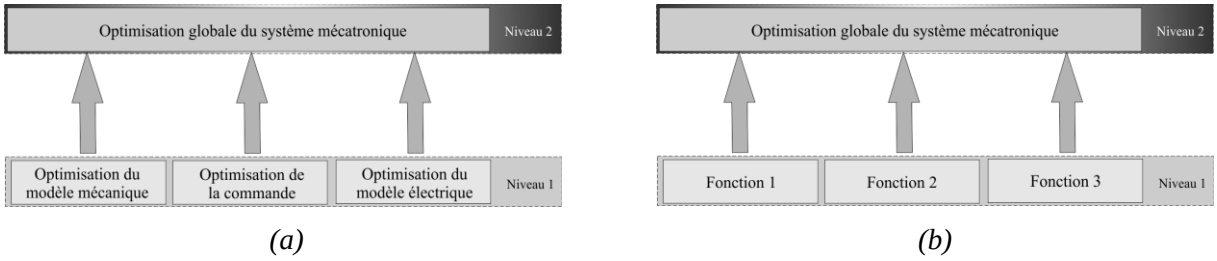
Parmi la catégorie des méthodes basées sur la préférence, on trouve les méthodes dites a priori, comme les méthodes lexicographiques ou les méthodes de la fonction valeur, pour lesquelles le choix du décideur s'effectue avant le processus de recherche de solutions optimales, le décideur peut trouver difficile de spécifier des préférences lorsqu'il n'a aucune ou peu de connaissances sur les valeurs optimales ; ainsi que les méthodes interactives pour lesquels le décideur a un rôle actif à tout moment du processus : avant, pendant et après la résolution du problème, comme les méthodes NIMBUS[15].

3.2 Application à la conception optimale de systèmes mécatroniques

Comme indiqué précédemment, la conception optimale consiste à utiliser des méthodes de recherche de solutions optimales, principalement des algorithmes évolutionnaires (algorithmes génétiques), durant le processus de conception de systèmes mécatroniques.

Compte tenu de la multidisciplinarité de la mécatronique, il est possible plusieurs méthodes différentes afin de concevoir ce type de systèmes. Tout d'abord, on peut distinguer le cas dans lequel on optimise le système complet en une seule opération et l'optimisation multi-niveau [13, 14] qui consiste, par exemple, à effectuer une première optimisation de différents sous-systèmes, représentant

au choix les disciplines (mécanique, électronique, automatique, …) mis en œuvre par le système (figure 4a) ou les fonctions (cinématiques ou issues de l'analyse fonctionnelle) réalisées par le système (figure 4b), ces fonctions pouvant être multidisciplinaires ; avant d'effectuer une optimisation globale du système mécatronique



(a) *(b)*

Figure 4. Deux méthodologies possibles d'optimisation multiniveau [13, 14]

La première méthodologie est la plus utilisée dans l'industrie et dans la littérature, principalement en raison de l'organisation des équipes de recherche et développement. En effet, on se trouve souvent dans le cas où l'on a des équipes de génie mécanique et électrique distinctes, qui réalise chacune les modèles correspondant à leurs champs d'application et sans réel interaction entre-elles. Ceci conduit à un produit mécatronique alliant de façon plus ou moins homogène la mécanique, l'électronique et l'automatique, qui essaye de corriger les problèmes d'interaction. De plus, rien ne dit que le fait d'assembler trois sous-systèmes optimaux implique que le système mécatronique résultant soit optimal !

Dans la méthodologie proposée figure 4b, la système résultant pourra permettre une meilleure interaction entre les différentes composantes mises en jeu, puisque chaque fonction peut être une fonction mécatronique. Par exemple, pour le cas d'une tondeuse à gazon électrique, la fonction principale qui est de réduire la hauteur de l'herbe est une fonction mécatronique. En effet, elle fait appel à un ensemble de composants, de la lame à la source d'énergie, en passant par la conversion d'énergie (moteur) et fait par conséquent appel à des éléments mécaniques, électriques et électromécaniques, voire automatique si l'on intègre une régulation ou des éléments sensoriels (caméras par exemple).

Dans cet article, nous nous intéresserons à la conception optimale et fonctionnelle de systèmes mécatroniques, en employant les théories de l'optimisation topologique.

4 Conception de systèmes mécatroniques par optimisation topologique

L'optimisation topologique, actuellement utilisée pour l'optimisation de structures ou de formes [9], permet de rechercher le modèle optimal sans aucune restriction, quitte à changer de façon conséquente le modèle initial.

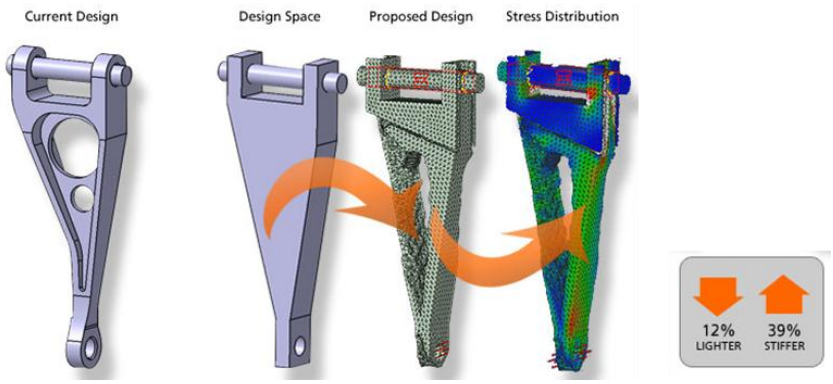


Figure 5. Exemple d'optimisation topologique d'une bielle à l'aide du logiciel CATOPO[16]

La figure 5 présente un exemple d'utilisation de l'optimisation topologique afin d'en améliorer les caractéristiques structurelles et ses performances. Ce processus est basé sur le principe de la modélisation éléments-finis. Parmi les nombreuses méthodes employées pour l'optimisation de formes ou de structures, on peut citer la méthode par homogénéisation [17] et l'optimisation par algorithmes génétiques [9, 18].

L'optimisation topologique d'un système mécatronique, tel que nous le voyons, est un processus qui permet d'optimiser, non pas les paramètres d'un modèle, comme c'est le cas de l'optimisation paramétrique, qui est très utilisée dans la littérature, mais le modèle lui-même. Optimiser le modèle mécanique est déjà possible, mais la question qui se pose est comment optimiser le modèle électrique et le modèle automatique (contrôle).

Tout d'abord, qu'entend-on par l'optimisation topologique de systèmes électriques ? Prenons un exemple simple, comme la conception d'un filtre analogique de type passe-bas, il serait intéressant pour cela d'avoir un système de conception assisté par ordinateur qui, en fonction des critères et contraintes définies, proposerait le circuit optimal qui permet de réaliser ce filtrage.

De même, pour la structure de commande, il est possible de choisir entre plusieurs structures de commandes, comme le PI ou le PID. L'algorithme d'optimisation topologique a ainsi pour objectif de déterminer le meilleur correcteur parmi l'ensemble des structures de commande en se basant sur des critères de stabilité, de robustesse (rejet de perturbations extérieures).

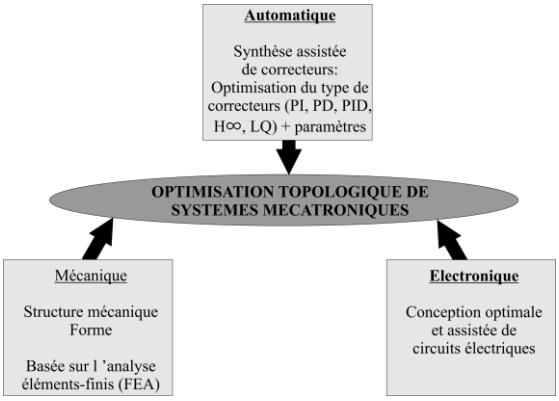


Figure 6. Principes de l'optimisation topologique de systèmes mécatroniques

Le schéma présenté figure 6 résume de manière concise ce que l'on attend de l'optimisation topologique de systèmes mécatroniques avec utilisation possible des aspects de conception optimale multiniveau. Afin de concrétiser cela, nous nous proposons d'appliquer cette méthodologie à un système mécatronique simple.

5 Exemple d'application : appareil de découpage laser

Afin que la démarche devienne plus concrète, on se propose d'appliquer cette dernière à un système de découpage par faisceau laser plan, schématisé figure 7.

Dans le schéma ci-dessus, quatre éléments sont présents : deux éléments structurels (1) qui servent à surélever et à assurer la translation de la poutre (2) suivant l'axe x, puis le laser qui se déplace sur la poutre (2) suivant l'axe y.

Ce système est un système optomécatronique qui associe la mécanique (structure), l'automatique (asservissement de position du laser), l'électronique pour l'alimentation des différents composants et l'amplification de puissance pour la commande et l'optique (laser).

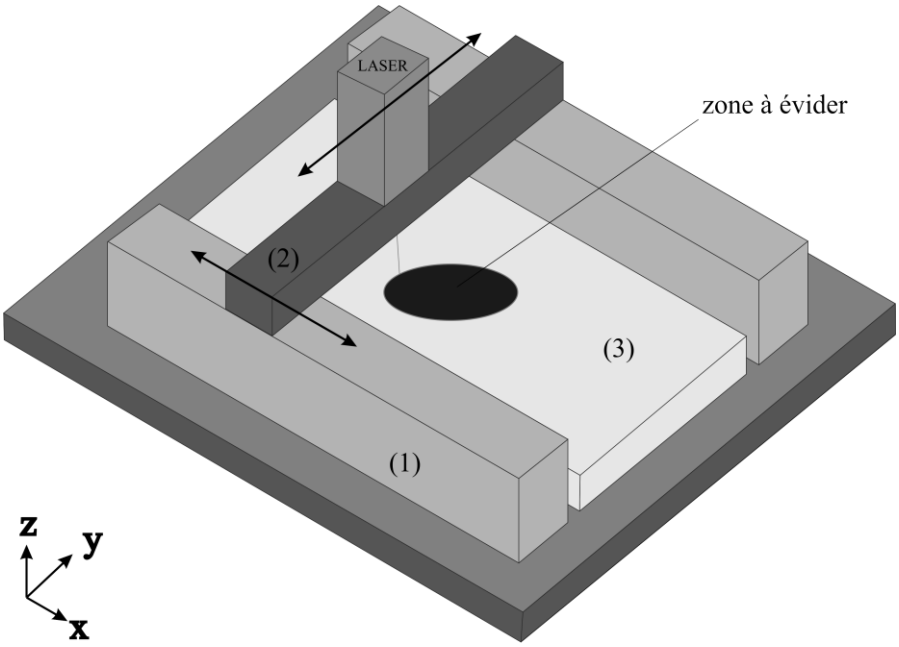


Figure 7. Schéma d'une table de découpage de précision par faisceau laser

La structure présentée est simple est peu coûteuse, mais ses inconvénients sont nombreux et incitent à modifier de manière importante le système. Parmi ces inconvénients, on retiendra principalement la position du laser qui doit translater sur la poutre (2) : compte tenu de la masse importante du laser, celle-ci va imposer une inertie au niveau de la structure qui va influer sur la précision et le temps de réponse du système.

On se propose d'utiliser l'optimisation topologique multiphysique afin d'améliorer les paramètres du système. Les objectifs pourraient ainsi être :

- Du point de vue de la mécanique, de déplacer le laser vers une structure fixe, comme le bâti. La masse n'aurait alors aucune influence sur les structures mobiles. La cinématique est ainsi améliorée. Il est donc nécessaire de prévoir des éléments optiques (miroirs, lentilles, …) afin de convoyer le faisceau laser vers l'endroit désiré. L'optimisation topologique aurait alors pour objectif d'effectuer ce changement de structure et d'ajouter les éléments de convoyage du faisceau de manière à optimiser la cinématique (notamment en diminuant l'inertie sur les éléments mobiles), mais également déterminer les dimensions exactes de toutes les structures afin de diminuer la masse de l'appareil en maintenant une bonne rigidité (comme dans l'exemple de la figure 5).
- En ce qui concerne l'automatique et l'informatique, l'asservissement de position doit être optimisé afin de garantir une erreur de position du faisceau laser sur le matériau à découper la plus faible, une stabilité et une robustesse de la commande face aux perturbations extérieures.
- Au niveau de l'électronique, l'optimisation topologique servirait à concevoir le circuit électronique chargé d'amplifier la consigne issu du système de commande qui doit être fournie au système pour la commande en position du laser, ainsi que les traitements des informations des capteurs.

Une fois chaque élément optimisé de façon indépendante, il convient de réaliser une dernière étape d'optimisation globale afin d'améliorer les interactions entre les différents éléments (mécanique, électronique, automatique et optique), de manière à concevoir un réel système optomécatronique intégré.

6 Conclusion

Cet article propose une méthodologie de conception de systèmes mécatroniques en utilisant les théories de l'optimisation, plus particulièrement de l'optimisation topologique.

Dans un premier temps, nous avons réalisé un état de l'art afin de recenser les travaux de recherches menés au niveau de l'optimisation de systèmes mécatroniques.

Puis, nous avons proposé une méthodologie de travail ayant pour but d'étendre la notion d'optimisation topologique, actuellement utilisée pour l'optimisation de structures ou de formes, pour des systèmes couplés multiphysiques comme les systèmes mécatroniques ou optomécatroniques.

Enfin, nous avons appliqué cette méthodologie à un exemple simple, une table de découpage laser, afin de concrétiser cette dernière.

Dans nos futurs travaux, nous approfondirons la méthodologie proposée avec notamment l'optimisation topologique de correcteurs.

Références

[1] AFNOR, "NF E01-010", 2000

[2] CETIM, "Etat de l'art et perspectives de la mécatronique dans l'industrie automobile en Europe et en France", Cetim, 2006.

[3] WIKIPÉDIA, "Mécatronique". (http://fr.wikipedia.org/wiki/Mécatronique)

[4] T. T. H. NG, G. S. B. LENG, "Application of genetic algorithms to conceptual design of a micro-air vehicle", Engineering Applications of Artificial Intelligence, vol. 15, p. 6, 2002.

[5] R. GUSERLE, M. F. ZAEH, "Application of multidisciplinary simulation and optimization of mechatronic systems in the design process", Proceedings, 2005 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics., pp. 922-927, 2005.

[6] R. BALLING, M. R. RAWLINGS, "Collaborative optimization with disciplinary conceptual design", Structural and Multidisciplinary Optimization, vol. 20, pp. 232-241, 2000.

[7] M. OUAEL, "Contribution à l'optimisation multiobjectif en conception multidisciplinaire", PhD thesis, INSA Lyon, 2010.

[8] E. COURTEILLE, *et al.*, "Design optimization of a Delta-like parallel robot through global stiffness performance evaluation", 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 5159-5166, 2009.

[9] G. ALLAIRE, "Conception optimale de structures", Springer, 2007.

[10] G. PAHL, W. BEITZ, "Engineering Design : A systematic Approach", 1988.

[11] G. P. RANGAIAH, "Multi-objective optimization", 2008.

[12] Y. COLLETTE, P. SIARRY, "Optimisation multiobjectif", Eyrolles, 2002.

[13] R. F. COELHO, P. BREITKOPF, "Optimisation multidisciplinaire en mécanique : Tome 1, Démarche de conception, stratégies collaboratives et concourantes, multiniveaux de modèles et de paramètres", Hermes Science Publications, 2010.

[14] R. F. COELHO, P. BREITKOPF, "Optimisation multidisciplinaire en mécanique : Tome 2, Réduction de modèles, robustesse, fiabilité, réalisations logicielles", Hermes Science Publications, 2010.

[15] J. H. Y. K. K. MIETTINEN, L. T. BIEGLER, "Interactive Multi-Objective Optimization of Simulated Moving Bed Processes using IND-NIMBUS and IPOPT", 2006.

[16] CATOPO. (http://www.catopo.com)

[17] G. ALLAIRE, "Shape Optimization by the Homogenization Method" vol. 24, Springer Berlin / Heidelberg, 2002.

[18] B. SID, "Optimisation topologique de structures par Algorithmes Génétiques", PhD thesis, univ-ubs.fr, Université de Technologie de Belfort-Montbélliard, Belfort, 2006.