



HAL
open science

Une démarche de conception et d'optimisation de systèmes mécatroniques à partir de l'optimisation multidisciplinaire et basée sur le retour d'expériences

Didier Casner, Rémy Houssin, Dominique Knittel, Jean Renaud

► To cite this version:

Didier Casner, Rémy Houssin, Dominique Knittel, Jean Renaud. Une démarche de conception et d'optimisation de systèmes mécatroniques à partir de l'optimisation multidisciplinaire et basée sur le retour d'expériences. 2013. hal-00842099

HAL Id: hal-00842099

<https://hal.science/hal-00842099>

Preprint submitted on 9 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.

Une démarche de conception et d'optimisation de systèmes mécatroniques à partir de l'optimisation multidisciplinaire et basée sur le retour d'expériences

D. Casner^a, R. Houssin^{a,b}, D. Knittel^{a,b}, J. Renaud^a

a. INSA de Strasbourg, Laboratoire du Génie de la Conception, 24 Boulevard de la Victoire, 67084 Strasbourg Cedex

b. Université de Strasbourg, UFR de Physique et d'Ingénierie, 15-17 Rue du Maréchal Lefebvre, 67100 Strasbourg

Résumé :

Les systèmes mécatroniques sont particulièrement difficiles à concevoir étant donné qu'ils requièrent des connaissances dans toutes les disciplines concernées de la part du concepteur. L'article proposé s'inscrit dans une démarche de conception routinière afin de pouvoir optimiser à la fois la topologie (la structure) d'un système mécatronique, ainsi que ses paramètres. L'optimisation topologique exige l'intégration de quatre disciplines : la mécanique, l'électronique, l'automatique et l'informatique ; ce qui nécessite deux types d'optimisation : l'optimisation continue pour la mécanique et l'optimisation discrète pour l'électronique ou l'automatique. Afin de résoudre cette problématique, une démarche de conception basée sur l'optimisation multidisciplinaire et utilisant le raisonnement à partir de cas est proposée. Cette approche a été appliquée à une étude de cas : la conception d'une pince robotisée.

Abstract :

Multidisciplinary systems are particularly difficult to design because the designer should have knowledge in all relevant disciplines. The proposed rule is part of a routine process design in order to optimize both the topology (structure) of a mechatronic system and its parameters. The topological optimization requires the integration of four disciplines : mechanics, electronics, control and computing, which requires two types of optimization : 'continuous' optimization can be used for mechanical engineering while 'discrete' optimization is required by electronic and control engineering. To solve this problem, a design approach based on multidisciplinary optimization and using the case-based reasoning, to find the best solutions by combining and adapting solutions from a solutions (cases) base, is presented in this paper. This approach is then applied to a case study : the design of a robotic gripper.

Mots clefs : systèmes mécatroniques ; optimisation ; démarche de conception

1 Introduction

Les produits mécatroniques [7] font désormais partie de nos vies et sont le résultat d'une intégration croissante de technologies issues de la mécanique, l'électronique, l'automatique et l'informatique. Ces systèmes utilisés quotidiennement, tels que les systèmes de transport aériens et terrestres, les robots, les disques durs, etc. sont également difficiles à concevoir et à optimiser car le concepteur a besoin de connaissances dans ces quatre disciplines.

Le problème d'optimisation de conception de systèmes mécatroniques est souvent limité à l'optimisation des paramètres d'un modèle sans affecter la topologie, le modèle lui-même.

Dans l'approche de conception classique, les aspects fonctionnels, puis d'autres aspects tels que la maintenabilité, la sécurité [6] ou l'utilisation [12] sont pris en considération pour évaluer les performances du système. En ce qui concerne les aspects d'optimisation, une phase d'optimisation se fait

durant la conception de chaque discipline. Normalement, le système de base (structure mécanique) est optimisé en utilisant des outils de CAO puis, elle est considérée comme une contrainte pour l'optimisation globale du système mécatronique. Or, dans cette approche, le module de traitement de l'information (partie commande) est optimisé pour compenser les défauts du système de base déjà conçu.

Cet article présente une approche de conception qui permet d'optimiser à la fois la topologie et les paramètres du système mécanique et d'éviter que la structure soit une contrainte du processus d'optimisation. Cette approche utilise des outils comme le raisonnement à partir de cas pour résoudre ce problème et il vise à aider l'ingénieur dans la conception et les processus d'optimisation pour les systèmes mécatroniques.

Dans les sections suivantes, l'approche de conception proposée pour l'optimisation des systèmes mécatroniques est présentée, puis elle est appliquée à la conception d'une pince de robot, enfin, les résultats sont discutés et les travaux futurs introduits.

2 Etat de l'art

2.1 Optimisation

Le processus d'optimisation [3, 11] de systèmes mécatroniques peut être divisé en deux types :

- L'**optimisation multidisciplinaire (paramétrique)** (OMD), qui est définie par [11] comme une méthodologie pour la conception des systèmes où l'interaction entre plusieurs disciplines doit être considérée, et où le concepteur est libre d'affecter significativement les performances du système dans plus d'une discipline. Différentes formulations de problèmes d'OMD ont été développées [3]. Ces formulations diffèrent principalement sur la façon dont les interactions entre les différents composants d'un système mécatronique sont prises en compte. L'OMD constitue une méthode d'optimisation paramétrique : le modèle paramétrique est considéré comme une contrainte et n'est pas affecté durant le processus.
- L'**optimisation topologique**, qui est actuellement utilisée pour l'optimisation de structures ou de forme, essentiellement en mécanique ou mathématique, en recherchant le modèle optimal, sans aucune restriction, même si la topologie doit changer radicalement. Ce processus est généralement fondé sur l'analyse par éléments finis [10, 1].

2.2 Positionnement des travaux

Afin de bien positionner notre démarche, nous nous basons sur le modèle de conception en V décrit dans [13] et présenté figure 1.

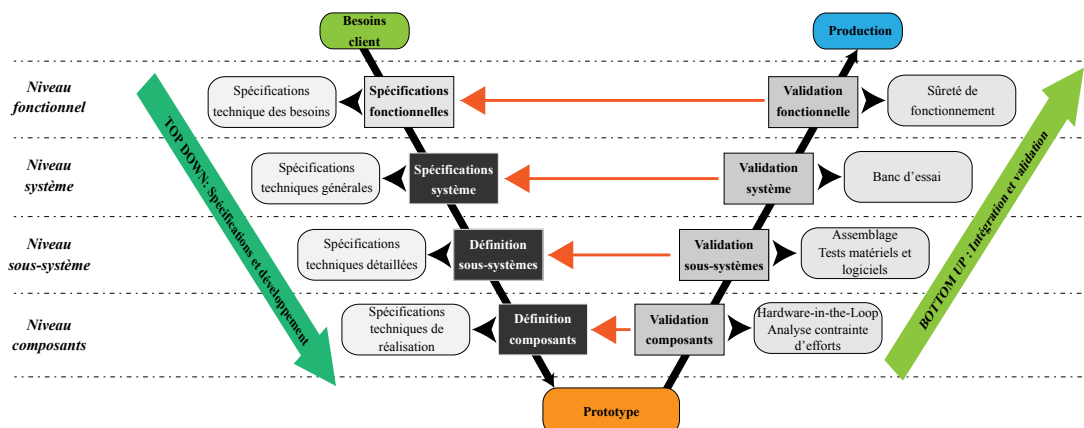


FIGURE 1 – Modèle en V pour la conception de systèmes mécatroniques [13]

Deux phases principales composent ce modèle de conception : l'étape "top-down" qui est chargée de la spécification et du développement, tandis que la phase "bottom up" vise à intégrer les différentes

technologies du produit et à valider les choix de conception par rapport aux besoins des clients.

Le processus d'optimisation paramétrique multidisciplinaire correspond à un processus de re-conception. Il vise à créer un nouveau produit à partir d'une solution existante afin d'améliorer ses performances sans ajout de nouvelles connaissances durant son processus de conception. L'optimisation paramétrique peut ainsi être placée dans l'étape ascendante (intégration et vérification), ce qui implique que l'optimisation intervient après que le prototype soit déjà conçu et fabriqué. Le processus va ainsi engendrer des coûts de conception élevés puisque le prototype est déjà obsolète lorsqu'il est fabriqué.

Le positionnement du processus d'optimisation dans la phase d'intégration et de vérification, une fois que le prototype a été conçu, va avoir pour conséquence que l'optimisation tardive des systèmes mécatroniques, dans l'étape de vérification, sera limitée par les choix effectués lors de la phase de conception (phase descendante).

C'est pourquoi, nous souhaitons intégrer le processus d'optimisation au sein de la spécification et l'étape de développement, et plus particulièrement dans les étapes grisées sur la figure 1.

3 La démarche de conception proposée

3.1 L'approche globale

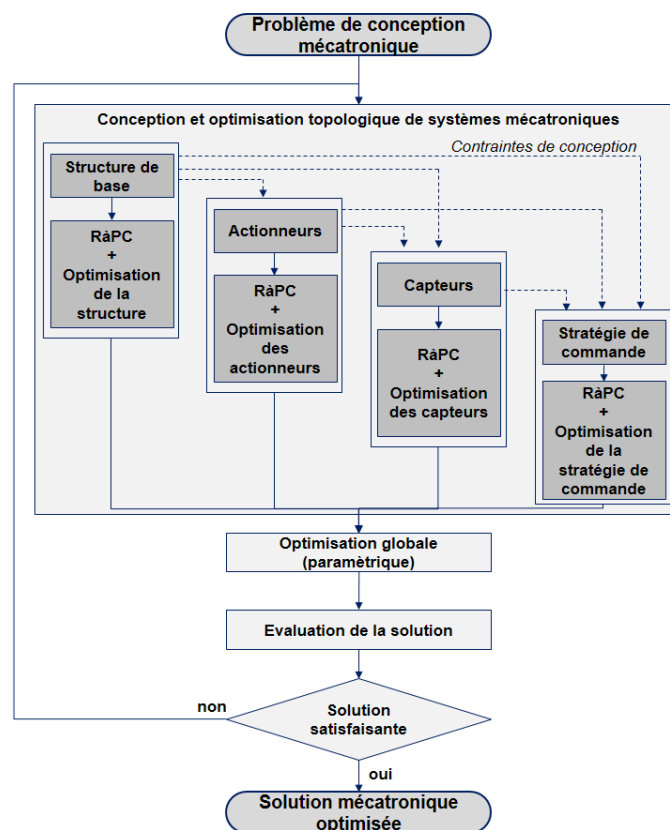


FIGURE 2 – L'approche globale de conception et d'optimisation de systèmes mécatroniques

L'approche proposée, résumée figure 2, vise à résoudre le problème d'optimisation de conception de systèmes mécatroniques et vise à permettre l'optimisation topologique.

L'approche proposée utilise un processus d'optimisation hiérarchisé. La conception mécatronique et l'étape d'optimisation est calquée sur la méthode utilisée par un ingénieur. Ce processus est nécessaire en raison de la structure d'un système mécatronique :

- La structure de base, généralement une structure mécanique, est tout d’abord définie. Cela conduit, par exemple, à un modèle CAO ou un schéma cinématique de la structure mécanique.
- Sur la base de ce modèle, les actionneurs sont sélectionnés : la structure mécanique influe sur la sélection sous la forme de contraintes de conception. Les types de liaisons cinématiques mises en œuvre dans la structure mécanique, vont, par exemple, contraindre les choix possibles pour les actionneurs (moteur ou vérin).
- Les capteurs sont ensuite sélectionnés en tenant compte de la structure mécanique et l’actionneur. Par exemple, le choix des capteurs de mesures articulaires est fonction des liaisons cinématiques et de l’actionneur (codeur linéaire ou angulaire, par exemple).
- La dernière étape consiste à définir la stratégie de commande qui nécessite souvent (par des stratégies de commande optimale ou robuste par exemple) un modèle complet du système (représentation d’état par exemple).

Le processus de conception, pour chaque sous-système, est détaillé au paragraphe 3.2

Une fois que le système mécatronique est conçu et que chacun des sous-systèmes sont optimisés localement, une étape d’optimisation paramétrique finale est réalisée. Cette étape comprend la prise de décision et des outils pour sélectionner et évaluer la solution.

Cette étape d’évaluation est ensuite prise en compte dans l’étape de décision ”convergence” : le processus d’optimisation est répété jusqu’à ce que la solution proposée converge vers la cible souhaitée. D’autres critères d’arrêt peuvent être envisagés pour éviter une boucle infinie si la cible n’est pas accessible.

3.2 Le processus de conception des sous-systèmes utilisant des outils de retour d’expériences

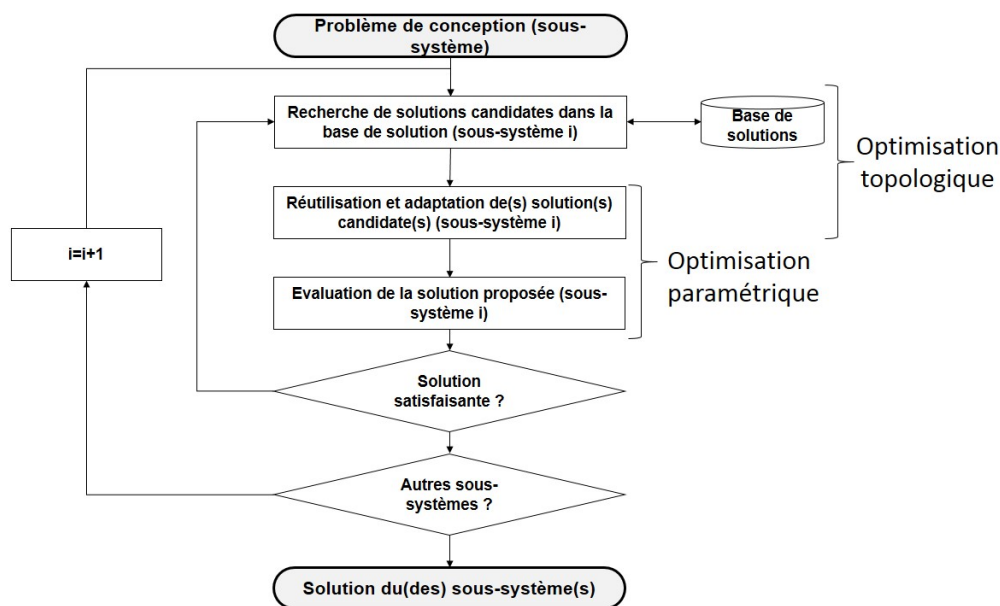


FIGURE 3 – Le processus de conception optimisée de systèmes mécatroniques basé sur le raisonnement à partir de cas

Cette sous-section détaille la démarche de conception qui est proposée pour optimiser les différents sous-systèmes (structure de base, actionneurs, capteurs et traitement de l’information).

- Cette approche, présentée figure 3, fait appel aux compétences du raisonnement à partir de cas [9, 2] pour rechercher des solutions candidates qui résolvent le problème de conception. Ces solutions peuvent être sélectionnés à partir d’un ensemble de solutions ou d’une base de données solution à l’aide du Raisonnement à Partir de Cas.

- Une fois que les solutions candidates sont choisies, la solution est obtenue en réutilisant directement l'une des solutions choisies précédemment, ou elle peut être construite en adaptant ou en combinant une ou plusieurs solutions. Cette étape conduit à une solution unique possible qui peut se traduire par un modèle paramétrique, dont les paramètres sont optimisés localement.
- Les résultats de l'optimisation paramétrique conduit à un front de Pareto. Les solutions obtenues sont évaluées par rapport au problème de conception (une cible par exemple).
- Les trois étapes précédentes sont exécutées jusqu'à ce qu'une solution satisfaisante soit obtenue. Un nombre maximum d'itérations est préférable au cas où l'algorithme ne convergerait pas.
- Une boucle supplémentaire a été ajoutée pour généraliser le problème de conception de sous-systèmes qui, pour certains, nécessitent la définition de plusieurs sous-systèmes d'un même type (un actionneur par liaison cinématique par exemple).

Pendant le processus d'optimisation locale d'un sous-système, les autres sous-systèmes précédemment définis sont considérés comme étant fixes.

4 Exemple : Conception d'une pince de robot

La démarche de conception a été appliquée à la conception d'une pince, destinée à être montée comme effecteur d'un robot. Cette démarche a notamment permis de définir, à partir du problème de conception (maximisation de la précision et minimisation du nombre de composants), un certain nombre de solutions candidates à l'aide du Raisonnement à Partir de Cas, présentées figure 4.

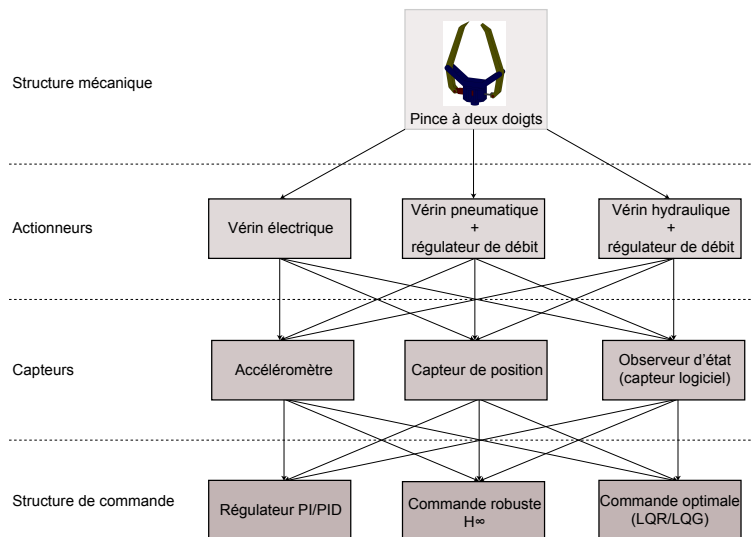


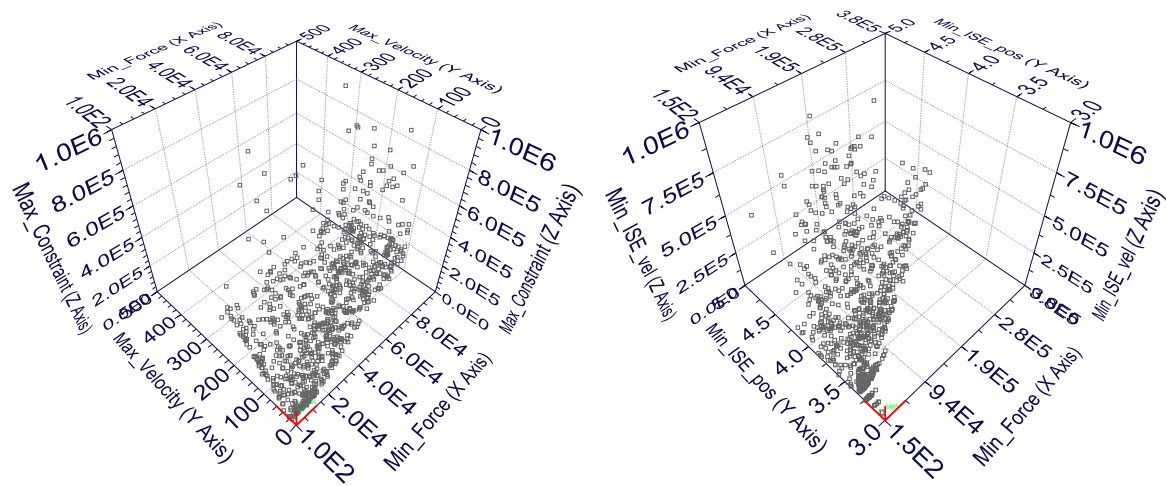
FIGURE 4 – Solutions candidates

La structure suivante a été considérée pour la suite :

- Actionneurs : Vérins électriques
- Capteurs : Capteurs de position et observateur d'état pour la vitesse
- Commande : Stratégie de commande Position-Vitesse-Force avec correcteurs PI

La phase d'optimisation globale, réalisée à l'aide de ModeFrontier et de Matlab/Simulink pour le simulateur. Durant le processus, les paramètres mécaniques (dimensions des "doigts" et position de l'axe de rotation) et des correcteurs (gains proportionnels et intégraux des correcteurs) ont été optimisés. En considérant les paramètres d'optimisation suivants (Population de 50 individus généré à l'aide de la méthode SOBOL, algorithme NSGA-II, 100 générations), nous avons obtenu les résultats d'optimisation suivants (voir figure 5).

Une fois que le front de Pareto a été obtenu, il est nécessaire d'utiliser des outils d'aide à la décision afin de sélectionner et évaluer les solutions au regard du problème de conception et des contraintes spécifiées par le client. Cette étape sera l'objet de travaux ultérieurs et n'est pas présentée ici. Les auteurs invitent le lecteur à se référer à [4] pour une présentation approfondie de l'exemple.



(a) Résultats concernant les critères mécaniques (b) Résultats concernant les critères automatiques

FIGURE 5 – Optimization results

5 Conclusions

Cet article propose une approche d'optimisation visant à aider l'ingénieur lors de la phase de conception et d'optimisation de systèmes mécatroniques. Cette approche a été appliquée à la conception d'un outil de préhension. Dans les travaux futurs, une plateforme logicielle, introduite dans [5], permettra d'automatiser le processus présenté ici.

Références

- [1] Allaire, G., 2007. *Conception optimale de structures*. Springer.
- [2] Armaghan, N., and Renaud, J., 2012. "An application of multi-criteria decision aids models for case-based reasoning". *Information Sciences*, **210**(0)55–66.
- [3] Balesdent, M., 2011. "Multidisciplinary design optimization of launch vehicles". Phd thesis, Ecole Centrale de Nantes.
- [4] Casner, D., Houssin, R., Knittel, D., and Renaud, J., 2013. "Proposal for a design approach for mechatronic systems based on optimization design and case-based reasoning". In ASME IDETC/CIE 2013. (Accepted for presentation).
- [5] Casner, D., Renaud, J., and Knittel, D. "Computer-aided design of mechatronic systems using multiobjective optimization and object-oriented languages". In ASME ESDA 2012.
- [6] Houssin, R., and Coulibaly, A., 2011. "An approach to solve contradiction problems for the safety integration in innovative design process". *Computers in Industry*, **62**(4)398–406.
- [7] Isermann, R., 1996. "Towards intelligent mechatronic systems". *Research in Engineering Design*, **8**(3)139–150.
- [8] Renaud, J., Bonjour, E., Morello, B., Fuchs, B., and Matta, N., 2008. *Retour et capitalisation d'expérience : Outils et démarches*. AFNOR.
- [9] Sid, B., 2006. "Optimisation topologique de structures par algorithmes génétiques". Phd thesis, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard.
- [10] Sobieszcanski, J., and Haftka, R. T., 1996. Multidisciplinary aerospace design optimization : Survey of recent developments. Tech. rep., NASA Langley Technical Report Server.
- [11] Sun, H., Houssin, R., Gardoni, M., and De Beuvron, F., 2013. "Integration of user behaviour and product behaviour during the design phase : Software for behavioural design approach". *International Journal of Industrial Ergonomics*, **43**(1)100–114.
- [12] Verein Deutscher Ingenieure, 2004. Vdi 2206 - Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme (design methodology for mechatronic systems).