



HAL
open science

Jeux dynamiques en optimisation couplée fluide-structure

B Abou El Majd, R Habbal, J. A. Désidéri, R Duvigneau

► **To cite this version:**

B Abou El Majd, R Habbal, J. A. Désidéri, R Duvigneau. Jeux dynamiques en optimisation couplée fluide-structure. AMTAM'07 Alger, 14 au 18 Avril 2007, Apr 2007, Alger, Algeria. hal-01567711v1

HAL Id: hal-01567711

<https://hal.science/hal-01567711v1>

Submitted on 24 Jul 2017 (v1), last revised 1 Oct 2017 (v2)

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.

Jeux dynamiques en optimisation couplée fluide-structure

B. Abou El Majd^{*}, A. Habbal^{**}, J-A. Désidéri^{***} and R. Duvigneau^{****}

^{*} Doctorant

Project Team Opale,

INRIA, 2004 Route des Lucioles, BP 93, F-06902 Sophia-Antipolis Cedex

Badr.AbouElMajd@sophia.inria.fr

^{**} Enseignant chercheur

Labo. J.A.D, Université de Nice Sophia-Antipolis, Parc Valrose, 06108 Nice Cedex 2, France

habbal@unice.fr

^{***} Directeur de recherche

Jean-Antoine.Desideri@sophia.inria.fr

^{****} Chargé de recherche

Regis.Duvigneau@sophia.inria.fr

RÉSUMÉ. L'optimisation multidisciplinaire (MDO) adresse le processus de conception des matériaux et des structures qui doivent être conformes à plusieurs critères, parfois antagonique. D'ailleurs, différents critères qui peuvent résulter de différents modèles, couplés ou pas. En raison de la nature de la concurrence des critères, des méthodes raisonnables non-arbitraires devraient être employées pour conduire le MDO, et clairement le paradigme de la théorie des jeux offre un tel cadre. Dans ce papier, nous présentons un cas d'étude de MDO en aéronautique, où le concepteur aérodynamique interagit avec le concepteur structural dans le cas du jeu de Nash et de Stackelberg. Les algorithmes développés ainsi que les résultats numériques de l'optimisation seront présentés.

ABSTRACT. Multidisciplinary optimisation (MDO) addresses the design process of materials and structures that must comply with several criteria, sometimes antagonistic. Moreover, different criteria may be derived from different models, coupled or not. Due to the competing nature of the criteria, rational non-arbitrary methods should be used to drive the MDO, and clearly game theory paradigm offers such a framework. In this paper, we present a case study of MDO in aeronautics, where aerodynamics designer interacts with structural designer in a Nash and Stackelberg games. The developed algorithms as well as numerical results of optimization are presented.

MOTS-CLÉS : Optimisation multidisciplinaire, Théorie de jeux, Analyse structurale, Aérodynamique, Voilure d'avion

KEYWORDS : Multidisciplinary optimization, Game theory, Structural analysis, Aerodynamic, Airfoil

1. Introduction

Des recherches considérables ont été menées en optimisation multidisciplinaires (MDO) en aéronautique. le papier de synthèse [2] donne un aperçu général, on cite aussi d'autres travaux plus récent [3][4]. L'une des applications des techniques d'optimisation multidisciplinaire est le couplage d'optimisation aérodynamique et structurale, en particulier pour une aile d'avion ou une configuration complète d'avion. Le couplage entre ces deux disciplines, aérodynamiques et structures, est très fort dans le sens où la première fournit le chargement nécessaire à la deuxième pour déterminer le champ de déplacement, le tenseur des contraintes, etc. En revanche, la structure change les propriétés aérodynamiques de la configuration initiale.

L'objet de ce travail consiste à étudier des algorithmes d'optimisation pour le couplage fluide-structure dans un régime où l'aérodynamique est le plus important. La forme d'aile d'avion doit résulter d'un compromis entre la performance aérodynamique et le critère structural. Une telle approche sera réalisée en utilisant la théorie des jeux dynamiques[9][8].

2. Formulation du problème d'optimisation

On s'intéresse dans cette étude à un problème d'optimisation de forme couplée entre l'aérodynamique et la structure (coque mince). Le but est d'améliorer la forme initiale vis-à-vis des critères aérodynamiques et structuraux en faisant appel à la théorie des jeux. Les deux optimisations communiquent parallèlement (jeu de Nash) ou hiérarchiquement (jeu de Stackelberg) par l'intermédiaire des paramètres de conception.

Le problème d'optimisation se formule généralement comme suit :

$$\min_Y J(Y) \quad (1)$$

avec Y est le vecteur de conception qui désigne les paramètres d'optimisation, et J est la fonctionnelle coût pour l'aérodynamique, on note $J = J_A$, ou pour la structure, on note $J = J_S$.

Le problème (1) consiste, pour $J = J_A$, à minimiser la fonctionnelle coût J_A , pour un jeu de paramètres, vis-à-vis des contraintes aérodynamiques et géométriques. On note que chaque évaluation de la fonction coût se traduit par la résolution des équations d'Euler compressible par la méthode de volumes finis en maillage non-structuré. Quant à l'optimisation structurale, il s'agit d'améliorer la géométrie initiale pour qu'elle ait une meilleure tenue mécanique possible en minimisant une fonctionnelle coût pour la structure. Chaque

évaluation de la fonction coût J_S passe par la résolution des équations de coque minces linéaires par des éléments finis DKT.

3. Représentation de forme

En optimisation de forme, on commence souvent par un profil déjà existant, et le but est d'améliorer ses performances. L'écart entre la forme initiale et la forme optimisée est petit, mais la différence entre leurs performances peut être substantielle. Donc, un meilleur moyen consiste à paramétriser la déformation plutôt que la forme elle-même. On utilise ainsi la méthode des boîtes englobantes (Free-form Deformation), qui a été proposée à l'origine par Sederberg et Parry [1], et qui consiste à déformer l'espace contenant la forme, plutôt que la forme elle-même. Autrement dit, pour tout noeud q du maillage, on a :

$$\mathbf{m}_q = \mathbf{m}_q^{init} + \sum_{i=0}^l \sum_{j=0}^m \sum_{k=0}^n B_i^l(s_q) B_j^m(t_q) B_k^n(u_q) \delta \mathbf{p}_{ijk}$$

où \mathbf{m}_q (resp. \mathbf{m}_q^{init}) représente les coordonnées de q dans le maillage courant (resp. dans la configuration initiale), $\delta \mathbf{p}_{ijk}$ sont les paramètres de conception qui servent à manipuler la déformation, et $\mathbf{t}_q = (s_q, t_q, u_q)$ représente les coordonnées FFD du q dans la boîte englobante.

On montre dans la figure (3) une représentation de forme de degré $6 \times 1 \times 1$ qui correspond à 28 points de contrôle. On fixe, durant le processus d'optimisation, le bord de fuite et le bord d'attaque, ce qui revient à fixer les sommets de la boîte englobante. On bouge seulement les points de contrôle dans la direction verticale.

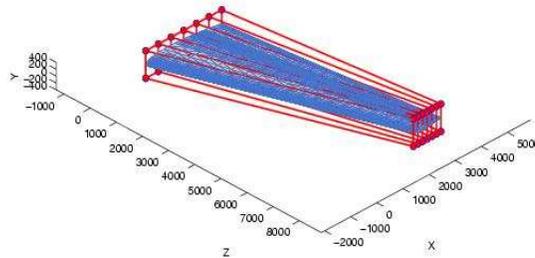


Figure 1. Exemple d'une représentation de Bézier de degré 6-1-1

4. Algorithme de couplage

On note par $Y = (Y_A, Y_S)$ la paramétrisation associée à une forme initiale. On désigne par Y_A la stratégie du joueur A "Aérodynamique", et par Y_S la stratégie du joueur S "Structure". On note par J_A (respectivement J_S) la fonction coût pour le joueur A (respectivement le joueur S).

4.1. Jeux de Nash

1) Soit $(Y_A^{(k)}, Y_S^{(k)})$ la paramétrisation initiale, et $P^{(k)}$ la pression aérodynamique associée.

2) On fixe $Y_S^{(k)}$, et on minimise J_A par rapport à Y_A . i.e :

$$\min_{Y_A} J_A(Y_A, Y_S^{(k)}) \rightarrow (Y_A^{(k+1)}, Y_S^{(k)})$$

3) On fixe $Y_A^{(k)}$, et on minimise J_S par rapport à Y_S en appliquant $P^{(k)}$ comme chargement par noeud. i.e :

$$\min_{Y_S} J_S(Y_A^{(k)}, Y_S) \rightarrow (Y_A^{(k)}, Y_S^{(k+1)})$$

4) $k = k+1$; goto (1)

4.2. Jeux de Stackelberg

Dans ce cas, le jeu est répété séquentiellement entre l'aérodynamique comme leader et la structure comme suiveur. Soit A et S les deux espaces d'actions du leader et du suiveur respectivement. On définit les deux fonctions $T^L : S \rightarrow A$ et $T^F : A \rightarrow S$ telles que :

$$T^L(s) = \arg \min_{a \in A} J_A(a, s), \forall s \in S$$

et

$$T^F(a) = \arg \min_{s \in S} J_S(a, s), \forall a \in A$$

1) Soit $(Y_A^{(k)}, Y_S^{(k)})$ la paramétrisation initiale, et $P^{(k)}$ la pression aérodynamique associée.

2) Le suiveur joue sa stratégie en appliquant $P^{(k)}$ comme chargement par noeud. Soit $Y_S^{(k+1)} = T^F(Y_A^{(k)})$

3) on évalue la fonction coût au point $(Y_A^{(k)}, Y_S^{(k+1)})$

4) Le leader choisit une autre stratégie : $Y_A^{(k+1)}$

5) $k = k+1$, goto (1)

Le point (Y_A^*, Y_S^*) est une solution de l'équilibre de Stackelberg si $Y_S^* = T^F(Y_A^*)$, avec $Y_A^* = \arg \min_{a \in A} J_A(a, T^F(a))$

5. Expérimentations Numériques

5.1. Données aérodynamiques

Dans ce cas test, on optimise une aile d'avion 3D en transonique régime. Les conditions d'écoulement libre sont les suivantes :

Nombre de Mach	0.83
Angle d'incidence	2°

Notre solveur utilise un maillage non-structuré composé par 31124 noeuds et 173445 éléments, et qui est adapté à un écoulement transonique avec un raffinement à l'emplacement du choc. L'écoulement est calculé en résolvant les équations d'Euler compressible avec une méthode de volume finis décentrée pour la discrétisation du flux convectif avec une extension au second ordre en utilisant MUSCL (Monotonic Upwind Schemes for Conservative Laws).

La procédure d'optimisation consiste à réduire le coefficient de la traînée C_D avec une contrainte sur la portance C_L qui ne doit pas diminuer de 0.1%. Cette contrainte est imposée par une pénalisation.

$$J_A = \frac{C_D}{C_{D_0}} + 10^4 \cdot \max \left(0, 0.999 - \frac{C_L}{C_{L_0}} \right) \quad (2)$$

avec C_{D_0} et C_{L_0} sont respectivement la traînée et la portance de la configuration initiale.

5.2. Données structurales

On utilise le Code Aster, développé par EDF, comme un outil d'analyse. C'est un code générale d'analyse par éléments finis qui étudie les comportements mécanique de structures. On se reportera aux différentes documentations (voir <http://www.code-aster.org>) pour avoir tous les détails sur les principes de fonctionnements et les règles d'utilisations.

L'étude concerne une coque mince dont la surface moyenne correspond à un maillage surfacique d'une aile d'avion, encadrée à l'emplanture, avec une épaisseur de 0.005m. Le matériau utilisé pour la structure de l'aile est un alliage d'aluminium de module de Young 68948 MPa et de coefficient de poisson 0.33.

Soit K_1 et K_2 deux constantes de pénalisations, V_A et S_A sont respectivement le volume et la surface de l'aile après une optimisation aérodynamique. La fonction coût pour la structure est comme suit :

$$J_S = \int_S \|\sigma \cdot n\| dS + K_1 \cdot \max\left(0, 1 - \frac{V}{V_A}\right) + K_2 \cdot \max\left(0, \frac{S}{S_A} - 1\right) \quad (3)$$

où σ est le tenseur des contraintes et n est le vecteur normal.

On impose deux contraintes, par pénalisation, sur le volume et la surface de l'aile pour minimiser l'effet du comportement structurale.

Par application d'un chargement par noeud (par exemple un champ de pression aérodynamique), Le champ des déplacements et le tenseur des contraintes sont calculés en résolvant les équations de coques minces linéaire en faisant appel au Code Aster.

5.3. Résultats

Dans ce cas test, on initialise l'algorithme du couplage par une forme déjà optimisée par un critère purement aérodynamique, le but est d'améliorer ses performances structurales avec une possible dégradation de ses performances aérodynamiques qui doit être raisonnable. On montre dans la figure (5.3a) les courbes de convergence des critères J_A et J_S . On constate que les deux courbes présentent des sauts qui sont dû à la nature "violente" du couplage, c'est ce qui explique d'ailleurs le grand nombre d'itérations qu'il aurait fallu pour atteindre l'équilibre. Dans la figure (5.3b) on montre le champ et les iso-valeurs de Mach respectivement sur la surface et à l'emplanture de la forme initial et à l'équilibre de Nash.

6. Conclusion

Un cas d'étude d'optimisation multidisciplinaire à été présentés sur une voilure d'avion d'affaire, où le concepteur aérodynamique interagit avec le concepteur structural dans le cas d'une stratégie de jeu de Nash. Les résultats numériques montrent la difficulté du problème qui est dû principalement à la nature du couplage, car aucune des deux disciplines ne tient compte des propriétés physiques de l'autre, l'échange se fait seulement par l'intermédiaire des paramètres d'optimisation, Il s'agit par conséquent de choisir un partage judicieux des paramètres entre les deux disciplines a fin de minimiser l'influence de la déformation structurale sur les performances aérodynamiques. Cette question de partage des territoires à été évoquée par [3] dans un autre contexte, et analysée récemment par [5]EUROGENERCOFTAC en consistance avec notre approche.

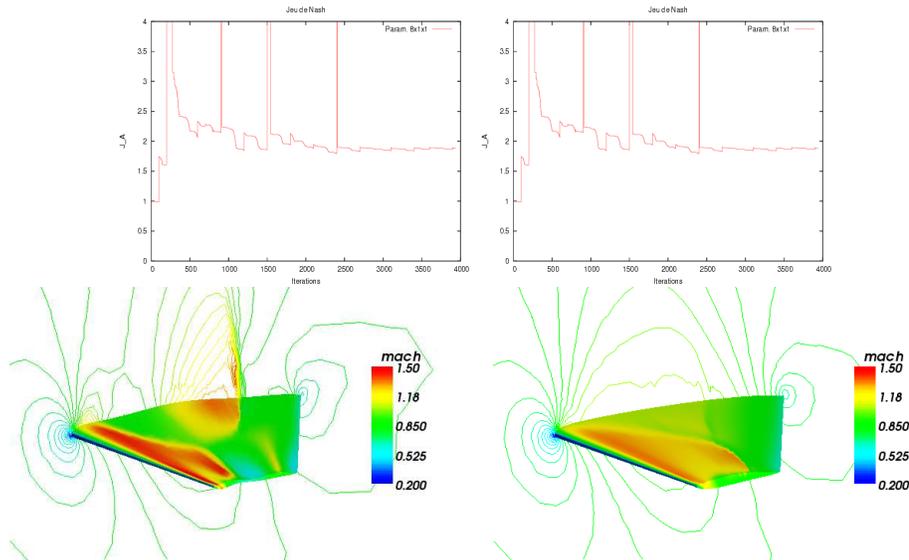


Figure 2. a)(en haut) : Les courbes de convergence des critères J_A et J_S , b)(en bas) : Champ de Mach associé à la forme initiale (à droite) et à la forme à l'équilibre (à gauche)

Bibliographie

- [1] Sederberg T. and Parry S., *Free-Form Deformation of Solid Geometric Models*, Computer Graphics 20, 4(1986), pp. 151-160.
- [2] Sobieszczanski-Sobieski J. and Haftka R. T., Multidisciplinary aerospace design optimization : Survey of recent developments, AIAA paper 96-0711, 34th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, NV, January 1996.
- [3] Tang Z.L., Désidéri J.A., Périaux J., Distributed optimization using virtual and real game strategies for aerodynamic design, Journal of optimization, theory and applications, to appear
- [4] Reuther J., Alonso J.J., Martins J.R.R.A., and Smith S.C., A Coupled Aero-Structural Optimization Method for Complete Aircraft Configurations, AIAA Paper 99-0187, Proceedings of the 37th Aerospace Sciences Meeting, Reno, NV, January 1999.
- [5] Abou El Majd B., Désidéri J. A. , Janka A., Nested and self-adaptive Bézier parameterization for shape optimization. International Conference on Control, Partial Differential Equations and Scientific Computing, Beijing, China. 2004.

- [6] Abou El Majd A., Désidéri J. A., Do T. T., Fourment L., Habbal A., Janka, A, Multilevel strategies and hybrid methods for shape optimization and application to aerodynamics and metal forming. In Evolutionary and Deterministic Methods for Design, Optimization and Control with Applications to Industrial and Societal Problems Conference (EUROGEN 2005) (pp. 12-14), 2005.

- [7] Abou El Majd B., Duvingneau R., Désidéri J.-A., Aerodynamic shape optimization using a full and adaptive multilevel algorithm, ERCOFTAC 2006 Design Optimization : Methods & Application, 5-7 April 2006, Gran Canaria, Canaria Island, Spain.

- [8] Habbal A., Petersson J., Thellner M., Multidisciplinary topology optimization solved as a Nash game, Int. J. Numer. Meth. Engng, 2004, vol. 61, no7, pp. 949-963.

- [9] Basar T., and Olsder G.J, Dynamic Noncooperative Game Theory, Second Edition, Academic Press, London and San Diego, 1995.