Archive des travaux d'un Groupe de Travail MDO

Olivier Allix[1], Piotr Breitkopf[2], Jean-Antoine Désidéri[3], Quang Dinh[4], Emmanuel Lefrançois[5], Rodolphe Le Riche[6], Lionel Leontoing[7], Mohamed Masmoudi[8], Gilbert Touzot[9], Michel Ravachol[10], Mourad Sefrioui[11], Laurent Vercouter[12]

[1] LMT, ENS Cachan, `Olivier.Allix@lmt.ens-cachan.fr`,
[2] UTC, `piotr.breitkopf@utc.fr`,
[3] INRIA Sophia, `Jean-Antoine.Desideri@sophia.inria.fr`,
[4] Dassault Aviation, `quang.dinh@dassault-aviation.fr`,
[5] UTC, `Emmanuel.Lefrancois@utc.fr`,
[6] CNRS et Ecole des Mines de St. Etienne, `leriche@emse.fr`,
[7] INSA de Rennes, `lionel.leontoing@insa-rennes.fr`,
[8] Univ. de Toulouse, `masmoudi@mip.ups-tlse.fr`,
[9] INSA de Rouen, `touzot@insa-rouen.fr`.
[10] Dassault Aviation, `michel.ravachol@dassault-aviation.fr`,
[11] Dassault Aviation, `mourad.sefrioui@dassault-aviation.fr`,
[12] Ecole des Mines de St. Etienne, `Laurent.Vercouter@emse.fr`,

21 nov 2003

1 Introduction

Ce document présente l'état d'une réflexion sur l'optimisation multi-disciplinaire (MDO pour *Multi-Disciplinary-Optimization*) amorcée lors de la réunion du 21 novembre 2003 chez Dassault Aviation.

En l'état, il ne constitue qu'un document de travail (un squelette et une mémoire), destiné à être ré-écrit par les participants au fur et à mesure des travaux. Par rapport aux compte-rendus de réunion, les aspects techniques du travail sont détaillés alors que les discussions administratives (forme du projet, ...) ne sont pas abordés.

Dans l'immédiat, Rodolphe Le Riche[1] centralise les modifications et compléments. La plupart des documents échangés sont disponible sur internet à l'adresse

`www.emse.fr/~leriche/MDOAFM/mdo1.html`,
userid `mdo`,

[1]tél : 0477420074, fax : 0477420249, leriche@emse.fr

passwd `mdoafm`.

Par exemple, nous vous remercions de bien vouloir compléter les références bibliographiques dans le fichier `biblio_mdo.bib`.

2 Définitions générales

La MDO répond à deux difficultés fondamentales de la conception moderne. La première est organisationnelle. Il s'agit de rapprocher des experts et des outils de domaines différents (acoustique, aérodynamique, mécanique, thermique, ...). La seconde difficulté est d'ordre mathématique et numérique. Il s'agit du grand nombre de paramètres optimisés et du temps d'exécution cumulé des modèles des différentes disciplines.

Voici quelques définitions de la MDO trouvées sur le site du comité technique AIAA pour la MDO[2] :

- "A methodology for the design of complex engineering systems and subsystems that coherently exploits the synergism of mutually interacting phenomena."
- "Optimal design of complex engineering systems which requires analysis that accounts for interactions amongst the disciplines (or parts of the system) and which seeks to synergistically exploit these interactions."
- "How to decide what to change, and to what extent to change it, when everything influences everything else."

Par rapport à la description de Christian Petiau ([17]), ces définitions omettent l'existence de modèles de précisions variables pour décrire un même phénomène au sein d'une même discipline. La MDO pourrait finalement être définie comme une méthodologie de conception de systèmes complexes qui prend en compte l'existence de différents phénomènes physiques couplés et utilise des modèles à plusieurs niveaux de précisions.

3 Etat de l'art et positionnement international

Les premières optimisations multi-disciplinaires datent des années 70 avec le développement de l'optimisation mathématique et son application en aéronautique.

[2] `endo.sandia.gov/AIAA_MDOTC/main.html`

Le domaine de la MDO a réellement pris son essor dans les années 90 et a retenu l'attention de nombreux travaux tant dans l'industrie que dans la recherche académique. Il existe aujourd'hui une société savante internationale (Int. Soc. for Struct. and Multidisciplinary Optimization), un journal (*Journal of structural and multidisciplinary optimization* chez Springer), une conférence internationale bi-annuelle (la AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference), ainsi que des symposiums et des sessions dédiées dans la plupart des conférences internationales de mécanique et d'aéronautique.

Début de bibliographie.
Certains des articles cités sont disponibles sur la page internet du groupe.
Formulations et états de l'art en MDO : [1, 3, 5, 8, 14, 18, 19]
Optimiseurs potentiellement applicables : [2, 9, 13, 16]
Modèles surrogates : [12, 15, 20]
Aspects informatiques :
Programmation orientée objet ; [4, 6, 7, 11].
Parallélisme ; [10].
Applications :
aéronautique ; général [17], aéroélasticité, propulsion, acoustique.
espace ;
automobile ; [3].
Prépondérance des travaux américains concernant la MDO. Les points suivants semblent avoir été peu ou pas considérés :
- Prise en compte de plusieurs modèles et de plusieurs niveaux de précision dans la formulation et dans l'algorithme de résolution du problème MDO.
- Prise en compte de toute l'information disponible (temps de calcul, indicateur de confiance dans le modèle).
- Création d'algorithmes d'optimisation pour la MDO (par opposition à utilisation d'un algorithme de minimisation non-linéaire généraliste). Cet algorithme devrait intégrer les remarques précédentes, et générer dans ses sorties des mesures de couplages entres modèles.

4 Formulation du problème d'optimisation MDO

Une notation est introduite pour formaliser le problème d'optimisation MDO en vue, plus tard, de proposer des algorithmes de résolution (ou optimiseurs).

4.1 Modèles

Soit une arborescence de modèles multi-disciplinaires multi-niveaux paramétrée par le vecteur des variables de conception x.
Mi^j est le i-ième modèle au niveau j. Un modèle peut être re-définit par niveau ou pas, seul le i est identifiant. Par exemple,

$M1^1$	: modèle analytique calculant la portée et masse maxi. au décollage.
$M2^2$	: calcul simplifié de trainée et portance
$M3^2$	: fact. crit. de charge struc. par RDM
$M2^3$	: calcul de trainée et portance par Euler
$M3^3$	: fact. crit. de charge struc. par EF
$M4^3$	: flambement local

Il est utile à ce stade de la discussion de marquer la différence entre deux couplages, le couplage "Multi-Disciplinary Analysis" ou MDA et le couplage MDO. Soit Ui^j, le vecteur état du modèle Mi^j. Par MDA, on entend le fait que l'état d'un modèle peut conditionner l'état d'autres modèles. Si par exemple Mi^j dépend de Mk^j, on a,

$$Ui^j \;=\; Mi^j(x, Uk^j(x)) \; . \tag{1}$$

Ce serait le cas si l'état aérodynamique définissait le chargement, donc l'état mécanique, du système. Il serait alors nécessaire d'évaluer le modèle aérodynamique avant le modèle mécanique. Il semble cependant, d'après la réunion du 21 Novembre 03, que nous nous placions pour commencer dans l'hypothèse simplificatrice d'**indépendance des physiques**. Ainsi,

$$Ui^j \;=\; Mi^j(x) \tag{2}$$

Le couplage MDO ne s'effectue lui que par l'intermédiaire directe des variables de conception x. Ainsi, la forme d'une aîle a une influence à la fois sur ses propriétés aérodynamiques et sur ses propriétés mécaniques, même si les modèles aéro et mécaniques n'interagissent pas physiquement.

4.2 Variables et critères

Soient xi^j les variables influant sur le modèle Mi^j, x^j toutes les variables du niveau j et x l'ensemble des variables.

La formulation d'un problème d'optimisation multi-critères avec contraintes (sans autres spécifications mathématiques) est très générale,

$$\begin{cases} \min_x f_1(x) \\ \dots \\ \min_x f_o(x) \\ \text{tel que } g_1(x) \leq 0 \\ \dots \\ g_m(x) \leq 0 \\ h_1(x) = 0 \\ \dots \\ h_p(x) = 0 \end{cases} \tag{3}$$

Cette formulation comprend la formulation classique mono-objectif sous contraintes, la formulation multi-objectifs et les problèmes de faisabilité (enlever les fonctions coût f_i). Fonctions coût et contraintes peuvent être ramenées à des **critères d'optimisation**, $C(x)$. Par exemple, pour

$$\begin{array}{ccc} & \min & \text{masse} \ , \\ \text{ou} & \text{masse} & \leq \ \text{masse\_ref} \ , \\ \text{ou} & \text{masse} & = \ \text{masse\_ref} \ , \end{array}$$

on définit le critère

$$C(x) \ = \ \frac{\text{masse}}{\text{masse\_ref}} - 1 \ .$$

L'optimiseur manipule les variables x d'après les valeurs des critères C. Nous introduisons maintenant un complément de notation pour lier critères et modèles multi-disciplinaires multi-niveaux. Ck_i^j est le k-ième critère d'optimisation et il est attaché au modèle M_i^j. Plusieurs critères sont typiquement attachés à un même modèle (e.g., trainée et portance au modèle aéro). Ck_i^j peut être spécifique à M_i^j. Par exemple, la portée de l'avion pourrait n'être estimée qu'au niveau 1. Ce sera également le cas lorsque le critère est définit au niveau le plus détaillé. Réciproquement, Ck_i^j peut exister à plusieurs niveaux, situation dans laquelle il y a plusieurs évaluations du même critère Ck. Ainsi, on peut imaginer une charge critique de flambement calculée analytiquement au moyen de la théorie des plaques au niveau 2 et par EF au niveau 3.

4.3 Aspects du problème MDO à prendre en compte dans l'optimiseur

4.3.1 Variables

– Les **variables privées** de Mi^j sont les variables qui n'affectent que ce modèle au niveau j. Les **variables publiques** sont les variables qui ne sont pas privées. Les variables privées définissent une décomposition du problème d'optimisation. Elles recevront certainement un traitement particulier par l'optimiseur car elles peuvent être optimisées localement à Mi^j, ce qui permet de réduire la taille globale du problème MDO.
– Une méthodologie d'optimisation spécifique à la MDO impliquera vraissemblablement des passages de variables entre niveaux. Ainsi, l'évidente stratégie "top-down" résout séquentiellement les problèmes d'optimisation du niveau le plus simple au niveau le plus complexe pour guider l'optimiseur dans les cas difficiles. La traduction des variables d'un même modèle définit à deux niveaux consécutifs, xi^j et xi^{j+1}, se fait par deux relations.
  $j+1 \rightarrow j$: le passage à un niveau de détail inférieur est donné par une relation explicite. Par exemple, on passe explicitement (et facilement) de la connaissance des dimensions d'une pièce à un niveau où seul son volume importe.
  $j \rightarrow j+1$: le passage à un niveau de détail supérieur génère typiquement une contrainte d'optimisation supplémentaire. Dans l'exemple précédent, on connait le volume d'une pièce au niveau j, V^j, ce volume devient une contrainte au niveau des dimensions de la pièce au niveau $j+1$, $\text{Volume}(xi^{j+1}) = V^j$.

4.3.2 Critères

Soit C, un critère à un niveau donné[3]. C est un scalaire, mais on le complétera d'autres caractéristiques intéressant un optimiseur MDO, à savoir,

– l'ensemble des variables, parmi toutes les variables, dont il est une fonction,
– un temps d'évaluation (qui change en fonction des modèles déjà estimés pour les variables courantes),

[3] allègement temporaire de notation pour ce paragraphe.

– un niveau de confiance (concept à préciser),
– l'existence de sensibilités, $\partial C/\partial x_l$, de dérivées secondes, ...

Il semble que pour manipuler efficacement des concepts tels que ces critères généralisés, un langage informatique orienté objet soit nécessaire.

Le produit de l'optimisation sera non seulement un ensemble de solutions, X^*, mais aussi des indicateurs de couplages (multiplicateurs de Lagrange) entre critères, $\frac{\partial Ci}{\partial Cj}(X^*)$.

5 Organisation du travail

1. Constitution de deux groupes de travail rassemblant des experts en acoustique, aérodynamique, mécanique et optimisation (fait le 21 Novembre 2003).
2. Définition d'un benchmark par Dassault dans les 6 mois concernant trois disciplines, l'acoustique, l'aérodynamique et la mécanique.
3. Construction de modèles surrogates à trois niveaux pour chacune des disciplines. L'objectif est ici de permettre aux partenaires de développer des solutions MDO sans posséder tous les outils disciplinaires. La difficulté de construction de modèles surrogates ne doit pas être sous-estimée. Il serait préférable de proposer une méthologie commune aux groupes de travail, cette méthodologie consistant en un plan d'expérience et une forme fonctionnelle pour représenter le système. Un avantage des modèles surrogates est qu'une fois réglés ils fournissent une réponse rapide. Il faudra cependant prendre en compte dans la stratégie d'optimisation le temps de réponse du modèle initial.
4. Parallèlement au point 3, définition d'un cas test non physique à partir des cas tests d'optimisation multi-critères.
5. Parallèlement aux points 3 et 4, développement d'optimiseurs spécifiques MDO.
6. Fusion points 5 et 3.
7. Application sur les modèles initiaux (chez Dassault Av.).

Références

[1] N. M. Alexandronov and R. M. Lewis. Comparative properties of collaborative optimization and other approaches to mdo. Technical Report CR-1999-209354, ICASE 99-24, NASA, Langley Research Center, VA, USA, 1999.

[2] T. Bäck. *Evolutionary Algorithms in Theory and Practice*. Oxford Univ. Press, New York, USA, 1996.

[3] J. Bennett, P. Fenyes, W. Haering, and M. Neal. Issues in industrial multidisciplinary optimization. In *Seventh AIAA/USAF/NASA/ISSMO Symposium on multidisciplinary analysis and optimization*, 1998. paper AIAA 98-4727.

[4] J. Besson and R. Foerch. Object-oriented programming applied to the finite element method – part 1 : General concepts. *Revue Européenne des Eléments Finis*, 7(5) :535–566, 1998.

[5] E. J. Cramer, J. E. Dennis, P. D. Frank, R. M. Lewis, and G. R. Shubin. Problem formulation for multidisciplinary optimization. Technical Report CRPC-TR93334, Center for Research on Parallel Computation, Rice University, Houston, TX, USA, 1993. presented at the AIAA Symposium on Multidisciplinary Design Optimization, September 1993.

[6] M.S. Eldred, A.A. Giunta, B.G. van Bloemen Waanders, S.F. Wojtk iewicz, W.E. Hart, and M. P. Alleva. *DAKOTA, A Multilevel Parallel Object-Oriented Framework for Design Optimization, Parameter Estimation, Uncertainty Quantification, and Sensitivity Analysis. Version 3.0 Users Manual*. Sandia Natl. Laboratories, Albuquerque, NM, USA, December 2001. Sandia Technical Report SAND2001-3796P.

[7] E. Gamma, R. Helm, R. Johnson, and J. Vlissides. *Design Patterns : Elements of Reusable Object-Oriented Software*. Addisson-Wesley professional computing series. Addisson-Wesley, 1994.

[8] J. P. Giesing and J.-F. M. Barthelemy. a summary of industry mdo applications and needs. In *Seventh AIAA/USAF/NASA/ISSMO Symposium on multidisciplinary analysis and optimization*, 1998. paper AIAA 98-????

[9] P.E. Gill, W. Murray, and M.H. Wright. *Practical Optimization*. Academic Press, San Diego,CA , USA, 1981.

[10] A.A. Giunta, V. Balabanov, S. Burgee, B. Grossman, R.T. Haftka, W.H Mason, and L.T. Watson. Variable-complexity multidisciplinary design optimization using parallel computers. In S. N. Alturi, G. Yagawa, and T. A. Cruse, editors, *Computational Mechanics '95 – Theory and Applications, Proc. of ICES '95, International Conference on Computational Engineering Science*, pages 489–494, Mauna Lani, Big Island, Hawaii, July 1995. Springer.

[11] R. Le Riche, J. Gaudin, and J. Besson. An object-oriented simulation optimization interface. *Computers & Structures*, 81(17) :1689–1701, 2003.

[12] R. Le Riche, D. Gualandris, J.-J. Thomas, and F. Hemez. Neural identification of nonlinear dynamic structures. *Journal of Sound and Vibration*, 248(2) :247–265, November 2001.

[13] R. Le Riche and F. Guyon. Dual evolutionary optimization. *Lecture Notes in Computer Science*, 2310 :281–294, 2002. Selected papers of the 5th International Conference, Evolution Artificielle.

[14] K. Lewis. Multidisciplinary design optimization. *Aerospace America*, page 42, December 2002.

[15] L. Ljung. *System Identification : Theory for the User*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, Etats-Unis, 1987.

[16] M. Luersen, R. Le Riche, and F. Guyon. A constrained globalized and bounded nelder-mead method for engineering optimization. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, March 2003. accepted for publication.

[17] C. Petiau. Mathematical optimization for aircraft design. In *workshop on optimal design*, Lab. Mécanique Solides, Ecole Polytechnique, France, November 2002.

[18] J. Sobieszczanski-Sobieski. Optimization by decomposition. In Kamat M. P., editor, *Structural optimization : status and promise*, volume 150 of *progress in astronautics and aeronautics*, pages 487–516. AIAA, 1993.

[19] J. Sobieszczanski-Sobieski and R. T. Haftka. Multidisciplinary aerospace design optimization : survey or recent developments. In *Proc. of the 34th AIAA Aerospace Science Meeting and exhibit*, Reno, NE, USA, 1996. paper AIAA 96-0711.

[20] E. Walter and L. Pronzato. *Identification de Modèles Paramétriques à partir de Données Expérimentales*. Masson, 1994.