

# Environnement support à l'optimisation collaborative pour une équipe de conception pluridisciplinaire

El-Hadi Mechekour, Vincent Riboulet, Philippe Marin

Laboratoire Sols-Solides-Structure (3S)  
Domaine Universitaire BP53  
38041 GRENOBLE Cedex 9

## Résumé :

*Une étude nous a permis d'identifier les difficultés rencontrées lors de la conception collaborative distribuée, ainsi que l'importance de l'optimisation pluridisciplinaire et cela dans un contexte d'entreprise étendue. Nous proposons dans cet article une approche intégrée pour l'optimisation. Une maquette d'un outil informatique supportant cette méthodologie de travail a été développée.*

## Abstract:

*A study enabled us to identify the difficulties encountered during a distributed collaborative design task, as well as the importance of multidisciplinary optimization in a context of extended company. We propose in this paper an integrated approach for optimization. A prototype for a software supporting this methodology has been developed.*

## Mots clefs :

**Conception collaborative ; Optimisation ; pluridisciplinarité.**

## 1 Introduction

Les entreprises sont de plus en plus sollicitées par la demande exigeante des clients et de l'environnement concurrentiel dans lequel elles évoluent. D'où l'apparition de l'« entreprise étendue » qui fait intervenir des équipes de conception composées d'experts de différentes cultures (sociale et professionnelle) qui sont géographiquement distribuées. Le travail mené en collaboration entre le laboratoire de mécanique « 3S » et le laboratoire d'électrotechnique « LEG » nous a permis de voir les difficultés rencontrées lors de la conception collaborative pluridisciplinaire à distance [1], ainsi que l'importance de l'optimisation pluridisciplinaire (MDO *Multidisciplinary Design Optimization*) [2][3][4] dans le développement de produits électromagnétiques. Une analyse effectuée indépendamment par les ingénieurs mécaniciens et électrotechniciens dans cette nouvelle configuration peut être très inefficace. L'approche d'optimisation intégrée proposée dans cet article permet aux ingénieurs de différents métiers de travailler ensemble pour formuler de manière conjointe le problème d'optimisation du dimensionnement de la structure.

## 2 Problématique

### 2.1 Application

L'exemple illustrant notre propos est le dimensionnement d'un déclencheur électromécanique [5]. Les contraintes principales du client sont la force résiduelle en position haute, l'énergie mécanique à fournir au noyau, et l'encombrement du dispositif. Une solution structurelle est donnée sur la figure 1 où la force et l'énergie sont fournies par un ressort. La force magnétique créée par l'aimant tient le noyau du déclencheur en position basse. Le flux magnétique, créé par un courant électrique dans la bobine, crée une force

opposée à celle de l'aimant, libérant alors le noyau qui se déplace vers la position haute sous l'effet du ressort. Le choix des dimensions du ressort est lié à la force de l'aimant qui doit maintenir la position basse, et à la force et l'énergie qu'il peut fournir en position haute, qui dépendent entre autres du poids et donc des dimensions du ressort. Il s'agit donc d'un problème couplé dans lequel les connaissances de différents métiers (électrique, magnétique, thermique, mécanique, économique) doivent conjointement être prises en compte.

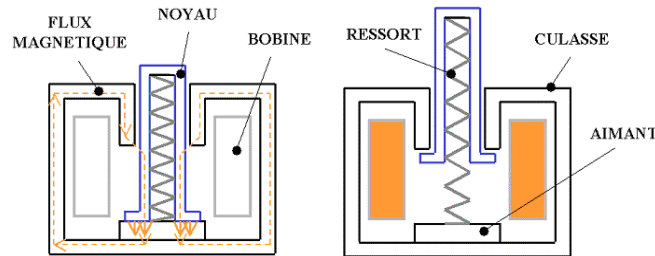


FIG. 1 – Principe de fonctionnement du déclencheur

## 2.2 L'équipe de conception

L'équipe de conception est constituée de trois professions. Deux professions du domaine de la mécanique contribuent à la conception et au dimensionnement du dispositif. D'une part, les ingénieurs de fabrication choisissent des matériaux et définissent le processus de montage et le processus de fabrication. D'autre part, les ingénieurs de calcul mécanique ont entre autres en charge le comportement dynamique du mécanisme. L'autre métier est celui des ingénieurs électrotechniciens qui s'occupent de l'étude électromagnétique du système. Les trois métiers sont dans des lieux géographiquement distribués et communiquent (collaborent) entre eux à travers Internet. De par les contraintes spécifiques des trois métiers, plusieurs problèmes de conflits dans le modèle de dimensionnement apparaissent. Citons à titre d'exemple, la contradiction entre fabrication et point de vue magnétique sur l'épaisseur de tôle et le mode d'assemblage de la culasse.

## 3 Optimisation pluridisciplinaire

### 3.1 Processus d'optimisation sous contraintes

Pour un dimensionnement global, nous proposons d'employer un modèle analytique établi dans un processus de collaboration par les trois professions. La représentation analytique offre des facilités pour représenter des aspects multiphysiques et permet d'obtenir un modèle complet incluant les différentes fonctions à optimiser. Les contraintes sur les paramètres du modèle de dimensionnement sont également définies par les trois professions. Le nombre de paramètres et de contraintes à prendre en compte peut alors être important. Le moteur d'optimisation utilisé est celui du logiciel Pro@Design développé au laboratoire LEG [6] et basé sur un algorithme de gradient déterministe.

### 3.2 Modèle de dimensionnement

#### 3.2.1 Modèle mécanique

Pour cette application, les ingénieurs de calcul mécanique ont développé un modèle analytique pour représenter le comportement du noyau et du ressort. Ce modèle intègre plusieurs conditions et contraintes fonctionnelles, géométriques, et de manufacturabilité, et le système doit entre autres garantir les conditions de fonctionnement suivantes : avoir un temps de réaction minimum, fournir l'énergie de percussion souhaitée, assurer la force résiduelle en position haute, et respecter une taille maximale pour le déclencheur. L'ingénieur mécanicien a donc développé un modèle mécanique du ressort conforme à ces conditions, tenant en compte des propriétés géométriques et mécaniques, et formulé par des relations telles que les suivantes :

$$F_r = k.(X-X_0)$$

$$k.(X_{low}-X_0) + m.2000 < F_{magnetic} + Weight$$

$$k.(X_{high}-X_0) > 15 + Weight$$

### 3.2.2 Modèle électromagnétique

Il concerne les composants électriques et magnétiques du dispositif. Il est basé sur des réductances et intègre des aspects thermiques et économiques du problème [5]. Dans ce modèle, compte tenu de la production en très grande série envisagée, les ingénieurs électriciens visent à minimiser les dimensions géométriques globales dans l'objectif de réduire au minimum la quantité de matériaux utilisés, et donc le coût total de production du dispositif.

### 3.2.3 Méthode de dimensionnement séparé et global

Il y a deux approches pour obtenir les dimensions du dispositif :

- un dimensionnement séparé dans chaque profession avec la synchronisation des résultats,
- un dimensionnement par une approche collaborative.

#### 3.2.3.1 Dimensionnement séparé dans chaque métier

Ce dimensionnement est basé sur des tâches asynchrones. Les résultats de chaque dimensionnement (mécanique et électrique) séparé sont discutés dans une revue de travail synchrone à l'aide des outils de communication via Internet. Ceci permet d'obtenir des contraintes globales validées par chaque profession. De cette façon, le dimensionnement global est obtenu. Cependant, plusieurs itérations de dimensionnement sont nécessaires pour converger vers un résultat... qui ne sera par forcément satisfaisant.

#### 3.2.3.2 Dimensionnement global (approche collaborative)

Le but de cette approche est de faire collaborer les deux métiers pour faire une optimisation basée sur un modèle de dimensionnement global. Pour cela, nous allons utiliser l'approche « boîte noire » proposée dans [7] (figure 2). Ce dimensionnement est basé dans un premier temps sur des tâches asynchrones au cours desquelles les ingénieurs mécaniciens et électriciens préparent leurs modèles métiers séparément et construisent un composant d'optimisation pour chaque métier. Ils obtiennent ainsi un modèle électromagnétique et un modèle pour le comportement mécanique du système. Une phase de dialogue synchrone permet dans un deuxième temps de s'informer mutuellement sur les paramètres en entrée et sortie, et sur les contraintes de chaque modèle, en vue d'effectuer les connexions entre composants nécessaires à la construction d'un composant d'optimisation global.

### 3.3 Les contraintes

Parmi le processus d'optimisation, chaque concepteur doit respecter différentes sortes de contraintes. En plus des contraintes habituelles imposées par l'industriel ou les clients, les concepteurs doivent respecter beaucoup de contraintes qui résultent d'autres professions. Ces contraintes inter-métiers sont souvent sources des conflits et contradictions. En fait, pendant leur travail dans leur métier, les concepteurs doivent échanger sur les conséquences de leurs décisions pour les autres métiers. Ces contraintes ont un grand impact sur les différents processus de dimensionnement. Nous proposons ci-dessous deux exemples de contraintes contradictoires (figure 3) :

- **L'épaisseur de la culasse :** Pour le point de vue mécanique, l'épaisseur de la culasse doit être faible pour faciliter le pliage de la tôle. C'est une contrainte d'assemblage et de fabrication. Ainsi, les ingénieurs mécaniciens préfèrent réduire au minimum l'épaisseur. Pour les ingénieurs électriciens, plus cette épaisseur est grande et plus faible sera la densité du flux magnétique. Par conséquent, du point de vue électrique, il est préférable de maximiser ce paramètre.
- **L'entrefer :** L'entrefer représente pour les ingénieurs électriciens une gêne forte pour le flux magnétique. Il doit donc être minimisé. Pour les ingénieurs mécaniciens, ce paramètre garantit d'une part le guidage du noyau et d'autre part l'usinabilité et l'assemblage du système. Donc, il ne doit pas être inférieur à une certaine limite.

Pour ces deux paramètres, un conflit entre les ingénieurs mécaniques et électriques existe. Il est très difficile de supprimer de tels conflits. Cependant, si les concepteurs considèrent très tôt de tels conflits dans le processus de dimensionnement, la concordance pour le modèle global de dimensionnement est rapidement meilleure et ainsi ceci accélère le dimensionnement.

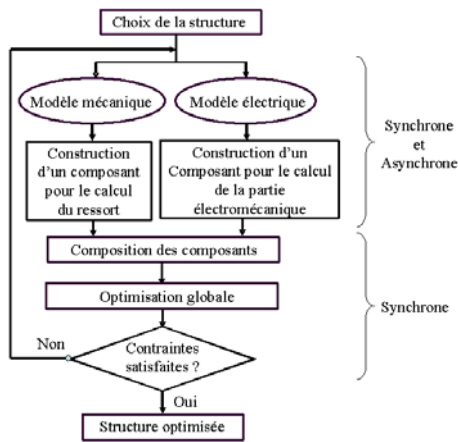


FIG. 2 – Construction d’un modèle global par l’approche boîte noire

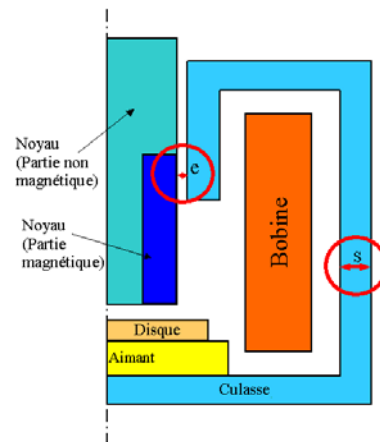


FIG. 3 – Exemples de contraintes conflictuelles

### 3.4 Résultats

#### 3.4.1 Dimensionnement séparé

Donc un premier cas de dimensionnement séparé les résultats obtenus après plusieurs itérations ne satisfaisaient pas toutes les contraintes du problème (figure 4 : interpénétration de certaines pièces). Afin d’obtenir une structure mécaniquement cohérente, les électriciens ont dû rechercher une sous-solution en relâchant des contraintes géométriques, mais la solution obtenue était alors trop grande (figure 5).

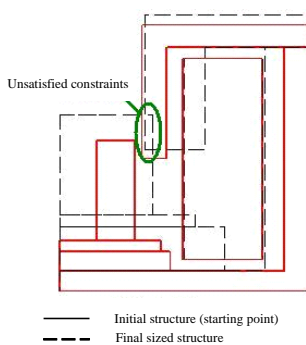


FIG. 4 – Optimisation séparée du dimensionnement : le produit avant et après l’optimisation

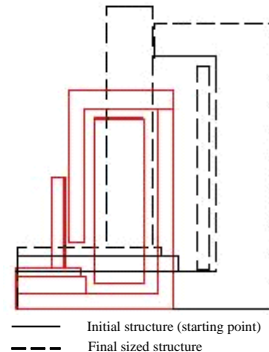


FIG. 5 – Solution obtenue par le relâchement des contraintes géométriques

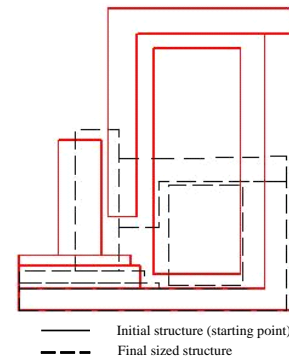


FIG. 6 – Solution finale obtenue par le dimensionnement collaboratif

#### 3.4.2 Dimensionnement global

Dans ces expériences, les ingénieurs mécaniciens ont développé un modèle plus détaillé du ressort et l’échangent avec les ingénieurs électriciens. De cette façon, le modèle (géométrique et physique) complet du

ressort développé par les ingénieurs mécaniciens est intégré par les ingénieurs électriques dans leur modèle. En conclusion, ces définitions de collaboration des paramètres conflictuels de dimensionnement permettent aux concepteurs de détecter des problèmes et de les résoudre. Si un conflit apparaît sur les mêmes caractéristiques, des échanges informels ont lieu entre les différents métiers afin de converger. Quand le modèle global et les caractéristiques globales sont définis, l'optimisation a été effectuée. Ici, une solution satisfaisant toutes les contraintes a été obtenue après 24 itérations. Mais, les ingénieurs de fabrication ont noté que le ressort est fait de quelques spires seulement. Une autre solution a dû être cherchée en employant un processus discret d'optimisation, garantissant que le ressort optimisé soit disponible dans un catalogue standard, en termes de nombres de spires, diamètre du fil et diamètre d'enroulement. Après plusieurs itérations, une solution acceptable satisfaisant toutes les contraintes a pu être trouvée (figure 6).

#### 4 Vers un environnement d'optimisation pluridisciplinaire

L'étude du ressort, liée avec l'optimisation de la structure globale du déclencheur électromagnétique, démontre clairement les avantages de développer une plate-forme d'optimisation pluridisciplinaire. Pour intégrer ce concept où on doit comprendre et respecter des contraintes imposées par d'autres concepteurs dans la conception collaborative distribuée, on a intégré le processus d'optimisation dans l'outil CoDISS (Collaborative Data and Information Sharing System) (figure 7).

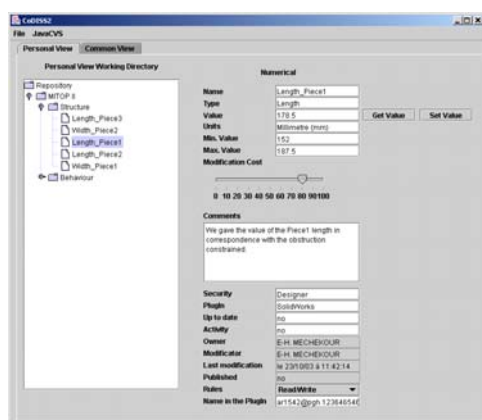


FIG. 7 – IHM de l'environnement CoDISS

```
<Optimization>
<Iterations Number="23">
  <Iteration Number="0">
    <Inputs Number="34">
      <Input Name="nr" Value="17.0"/>
      <Input Name="muzero" Value="1.2566E-6"/>
      ..... tous les autres 'inputs' pour la première itération
    </Inputs>
    <Outputs Number="59">
      <Output Name="c13" Value="24.0"/>
      <Output Name="c12" Value="2.9999999999999982"/>
      ..... tous les autres 'outputs' pour la première itération
    </Outputs>
  </Iteration>
  <Iteration Number="1">
    ..... toutes les autres itérations
  </Iteration>
</Iterations>
```

<Optimization>

FIG. 8 – Format XML des résultats de l'optimisation

L'objectif principal de l'environnement CoDISS [8] est de créer un cadre supportant la conception collaborative avec un espace commun d'information partagée, lié aux interfaces de plusieurs métiers. Ces liens fournissent l'appui pour la communication (formelle et informelle) et également un mécanisme de création « dynamique » des relations entre les paramètres intérieurs du logiciel métier. Ainsi les aspects d'optimisation pluridisciplinaire étudiés dans cet article sont l'un des aspects de cet environnement de conception collaborative.

Une implémentation d'une nouvelle fonction permet à des paramètres dans CoDISS d'être mis à jour automatiquement en utilisant le fichier des résultats produit par Pro@Design (figure 8). Les concepteurs se rendent toujours compte de la dernière version de l'ensemble des paramètres qui les intéressent, et peuvent soumettre une modification à tous autres concepteurs. Ceci crée une prise de conscience mutuelle du problème. En outre, le mécanisme de l'environnement CoDISS fournira non seulement la concordance des données, mais permettra également l'échange pendant des phases amont des contraintes qui seront employées pour l'optimisation. Par la suite, il fournira un moyen de diffuser les résultats d'optimisation pour l'analyse individuelle de chaque concepteur.

#### 5 Conclusion

Avec un processus de dimensionnement séparé, les concepteurs n'obtiennent pas ou ont de grandes difficultés à converger vers une solution satisfaisant toutes les contraintes. En effet dans ce cas les sous-solutions obtenues sont souvent incohérentes car elles répondent à un seul point de vue sur un problème couplé et donc la structure globale ne peut pas répondre à toutes les conditions. En adoptant une approche d'optimisation intégrée, le support du moteur d'optimisation itérative évite d'avoir de longues boucles de développement entre les concepteurs, et fournit une manière efficace de trouver un ensemble acceptable de valeurs correspondant au cahier des charges du produit. Il peut également être rapidement identifié si les solutions communes n'existent pas, favorisant ainsi de tendre vers la construction dynamique des caractéristiques de développement de produit. Enfin, nous voulons souligner l'importance, autant que des modèles et moteurs d'optimisation, de la collaboration directe entre ingénieurs des différents métiers impliqués dans la formalisation conjointe du problème couplé. Nous sommes ainsi convaincus de la nécessité de poursuivre les efforts pour le développement d'outils facilitant les processus collaboratifs et l'échange d'information autour de problèmes techniques tels que celui-ci.

## Remerciement

Nous souhaitons remercier nos collègues du LEG, ainsi que S. Gowers de l'Université de Bath (UK), pour leur participation aux expériences et analyses, ainsi que pour les développements spécifiques effectués dans le cadre de cette étude.

## References

- [1] B. Delinchant, V. Riboulet, L. Gerbaud, P. Marin, F. Noël, F. Wurtz, « E-Cooperative Design Among Mechanical and Electrical Engineers: Implications for Communication Between Various Professional Cultures ». IEEE Transactions on Professional Communication, vol.45, no. 4, Dec 2002.
- [2] J. Sobieszcanski-Sobieski, « Multidisciplinary design optimization: an emerging new engineering discipline », In J. Herskovits (ed.) Adv. Struct. Opt., Amsterdam, Kluwer, 1995, pp. 483–496.
- [3] I. Kroo, V. Manning, « Collaborative Optimization: Status and Directions », 8th AIAA/NASA/ISSMO Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization, 6-8 September 2000, Long Beach CA, AIAA-2000-4721.
- [4] A. Giassi, F. Bennis, J.J. Maisonneuve, « Multidisciplinary Design Optimisation and Robust Design Approaches Applied to Concurrent Design », Structural and Multidisciplinary Optimization, Springer Berlin Heidelberg, 04.08.2004, vol. 28, no. 5, pp. 356-371
- [5] E. Atienza, F. Wurtz, J. Bignon, M. Perrault, V. Mazaauric, « A Methodology for the Sizing and the Optimisation of an Electromagnetic release », IEEE Transactions on Magnetics, vol. 36, No. 4, July 2000, pp. 1659-1663.
- [6] B. Atienza, J. Bignon, F. Wurtz, V. Leconte, « EDEN: A generic integrated component software for constraint optimisation », 13th Conference on the Computation of Electromagnetic Fields (Compumag 2001), July 2-5, 2001, Evian, France, pp.232-233.
- [7] B. Delinchant, F. Wurtz, J. Fandino, « Mixing of FEM and analytical modeling: preliminary design of a transformer », Optimisation and Inverse Problems in electromagnetism, edited by M. Rudnicki and S. Wiak, Kluwer academic publishers, 2003, pp 245-252.
- [8] V. Riboulet, P. Marin, « Towards a new set of tools for a collaborative design environment », Proc. of 7th Int. Conf. on Computer Supported Cooperative Work in Design CSCWD2002, pp.128-133, Sept. 25-27 2002, Rio de Janeiro, Brazil.