



**HAL**  
open science

# La CAO et l'optimisation de systèmes, une approche par couplages dynamiques de composants

Benoît Delinchant

► **To cite this version:**

Benoît Delinchant. La CAO et l'optimisation de systèmes, une approche par couplages dynamiques de composants. Energie électrique. Université de Grenoble, 2011. tel-00677457

**HAL Id: tel-00677457**

**<https://theses.hal.science/tel-00677457>**

Submitted on 8 Mar 2012

**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.

## RAPPORT DE SYNTHÈSE

Pour obtenir l'

## HABILITATION A DIRIGER DES RECHERCHES

Spécialité **Génie Electrique**

Intitulée

## **La CAO et l'optimisation de systèmes, une approche par couplages dynamiques de composants**

Présentée par

**Benoit DELINCHANT**

HDR soutenue publiquement le « **8 décembre 2011** »,  
devant le jury composé de :

- |   |              |
|---|--------------|
| <b>M. Xavier ROBOAM,</b><br>Directeur de recherche, CNRS, LAPLACE, TOULOUSE         | (Rapporteur) |
| <b>M. Frédéric NOEL</b><br>Professeur des Universités, INP, G-SCOP, Grenoble        | (Rapporteur) |
| <b>M. Stéphane BRISSET</b><br>Maître de Conférence HDR, Ecole Centrale, L2EP, Lille | (Rapporteur) |
| <b>M. Jean-Louis COULOMB</b><br>Professeur des Universités, INP, G2ELab, Grenoble   | (Président)  |
| <b>M. Didier DONSEZ</b><br>Professeur des Universités, UJF, LIG, Grenoble           | (Membre)     |
| <b>M. João Antonio VASCONCELOS</b><br>Professeur, UFMG, Belo Horizonte Brésil       | (Membre)     |
| <b>M. Wilfrid MARQUIS-FAVRE</b><br>Maître de Conférence HDR, INSA, Ampère, Lyon     | (Membre)     |
| <b>M. Xavier BRUNOTTE</b><br>Dirigeant VESTA-System, Grenoble                       | (Membre)     |





## Avant-propos

Ce document a été rédigé en vue de l'obtention de l'Habilitation à Diriger des Recherches qui est un diplôme universitaire dont la finalité est de permettre d'assumer pleinement la direction de thèses. Le Collège Doctoral de l'Université de Grenoble nous demande pour cela d'éviter un catalogue exhaustif de l'ensemble de nos travaux. Ainsi le manuscrit est plutôt centré sur quelques aspects du travail de recherche effectué, et se termine par une partie de perspectives et de projets scientifiques. Il vise à mettre en avant les différents aspects que ce diplôme sanctionne tels que le niveau scientifique, le caractère original de la démarche, l'aptitude à maîtriser une stratégie de recherche dans un domaine scientifique ou technologique suffisamment large, ainsi que la capacité à encadrer de jeunes chercheurs.

## Remerciements

Ce manuscrit menant au diplôme de HDR est une synthèse de 10 années de recherches auxquelles ont contribué de nombreuses personnes que je remercie. Je remercie mes 3 rapporteurs pour avoir accepté de rapporter sur ce mémoire et pour m'avoir donné sans retenue leur avis pertinent suite à un impressionnant exercice de synthèse. Xavier ROBOAM, Directeur de recherche CNRS au laboratoire LAPLACE de Toulouse, pour son expertise et sa vision globale en conception des systèmes mécatroniques. Frédéric NOEL, Professeur des universités de Grenoble INP du laboratoire G-SCOP pour sa vision sur les méthodes de CAO intégrant les acteurs humains. Stéphane BRISSET, Maître de conférence HDR à l'école centrale de Lille et au laboratoire L2EP pour son expertise en conception et optimisation en génie électrique.

Je remercie également les membres de mon jury de soutenance pour leur participation et leurs contributions grâce à des points de vue très complémentaires. Didier DONSEZ, Professeur à l'université Joseph Fourier et au laboratoire LIG de Grenoble pour son enthousiasme communicatif vis-à-vis des technologies informatiques. João Antonio VASCONCELOS, Professeur à l'UFMG de Belo Horizonte au Brésil, pour sa venue en France et sa participation active au Laboratoire International Associé Maxwell. Wilfrid MARQUIS-FAVRE, Maître de conférence HDR à l'INSA de Lyon et au laboratoire Ampère, pour avoir apporté sa vision d'automaticien, ainsi que ses corrections, sur ce mémoire.

Il me reste deux membres du jury à remercier, tout d'abord Xavier BRUNOTTE, dirigeant de VESTA-System, pour la confiance qu'il porte aux approches développées dans notre laboratoire, pour les perspectives de valorisation qu'il offre à nos résultats, mais aussi pour la bonne humeur qu'il sait faire partager en toute circonstance. Enfin, le Président du jury, Jean-Louis COULOMB, Professeur des universités à Grenoble INP, et chercheur de l'équipe MAGE du G2Elab. Si je devais exprimer mes ambitions de chercheur, elles seraient de parvenir à faire tout ce que Jean-Louis réalise (développements, encadrements, valorisations industrielles et pédagogiques...) sur ses thématiques qui me passionnent également (modélisation, optimisation, génie logiciel).

Les travaux présentés dans ce mémoire ont été réalisés au laboratoire de génie électrique de Grenoble (G2Elab) qui est dirigé par James ROUDET et Yves MARECHAL, dont j'admire l'engagement pour que ce laboratoire fasse parti de l'Excellence dans le domaine. Mon travail quotidien se fait dans l'équipe MAGE avec des chercheurs et enseignants/chercheurs passionnés qui me font apprécier la recherche que nous y menons. Etant une équipe à vocation transversale, une interaction forte se fait également avec les autres équipes du labo et donc avec d'autres chercheurs tous autant passionnés que je remercie aujourd'hui.

C'est d'ailleurs grâce à cette transversalité que j'ai pu travailler avec de nombreux collègues du laboratoire et je voudrais ici remercier plus spécialement ceux avec qui j'ai co-

encadré des thèses. Jean-Louis COULOMB, que j'ai déjà mentionné. Orphée CUGAT et Gilbert REYNE, outre leur personnalité hors du commun, je les remercie pour les nombreuses occasions durant lesquelles ils m'ont fait découvrir leurs méthodes de conception de structures innovantes de MEMS. Jean-Pierre KERADDEC pour son expertise des transformateurs et leur modélisation par constantes localisées. Jean-Paul YONNET pour son expertise des systèmes à aimants et leur modélisation analytiques. Olivier CHADEBEC pour sa connaissance des méthodes numériques en électromagnétisme et ses idées passionnées.

Enfin, j'ai également co-encadré des thèses avec Laurent GERBAUD et Frédéric WURTZ mais c'est bien plus que cela que je partage avec eux depuis que je suis au laboratoire. Si je ne devais retenir que deux personnes à remercier ici ce serait LAURENT et FRED, car c'est grâce à eux que je fais ce métier. Nous travaillons en trio depuis mon recrutement et je considère notre collaboration comme un plaisir au quotidien, spécialement durant nos réunions CADES. Je remercie aussi FRED pour son travail de responsable de l'équipe MAGE et pour les nombreux projets auxquels je participe grâce à lui.

Mon travail de chercheur a été pour beaucoup un travail d'encadrement et je voudrais donc remercier très sincèrement mes doctorants qui ont fait, et qui font, un travail remarquable. Ceux qui sont déjà partis et qui ont trouvé un travail dans lequel ils valorisent leurs travaux de recherche, HICHEM mon premier micron géant, LALAO alias MacMMems, ABDEL jeune marié qui a donné naissance à un manuscrit 18 mois après son terme, et PHUONG le dernier accouchement en date. Ceux qui restent mais qui partiront un jour (sniff), SANA et ABIR dont je ne regretterai pas que les pâtisseries orientales, CHRISTOPHE alias hpc-gpu, LOUNES, HOANG-ANH alias le philosophe d'extrême orient, et MATHILDE qui ne me subit que depuis quelques mois.

Je remercie aussi tous ceux qui ont contribué aux travaux présentés dans ce mémoire, en particulier Franck VERDIERE, Petre ENCIU, Pierre-Yves GIBELLO et Laurence ESTRABAUD.

Des résultats présentés sont également le fruit de collaborations avec des chercheurs d'autres laboratoires, d'autres pays que je remercie également.

Enfin je profite également de cette page pour remercier tous mes amis qui bossent au labo et qui indirectement ont eux aussi contribué à ce travail.

# La CAO et l'optimisation de systèmes, une approche par couplages dynamiques de composants

## Résumé

C'est au travers d'un panel d'applications de conception en génie électrique, issu de mes travaux de recherche et d'encadrements doctoraux, qu'est illustrée une problématique inhérente à la « conception système », celle des couplages. Ceux-ci interviennent au niveau de la définition des modèles du système (multi-physiques, multi-formalismes, multi-niveaux...) mais aussi au niveau des analyses possibles sur ce système (simulation dynamique, analyse de sensibilité, optimisation sous contraintes, robustesse, ...). Cette nature complexe est associée à la nature dynamique de la conception système, dans le sens où les couplages naissent en cours de processus. Ces deux caractères font que la réalisation d'outils de CAO adaptés est un véritable challenge que je cherche à relever en répondant à un ensemble d'enjeux décrits dans ce rapport. Pour ce faire, nous disposons, dans mon équipe de recherche, du framework logiciel CADES. Il constitue à la fois notre plateforme expérimentale et le réceptacle de méthodologies que nous valorisons pédagogiquement et industriellement. Mes contributions à ce framework, sont principalement méthodologiques mais également applicatives dans le domaine des MEMS magnétiques et du bâtiment intelligent. Elles sont majoritairement axées vers l'optimisation sous contraintes, en particulier par des formalismes de modélisation dédiés et des méthodes de génération automatique de calcul de Jacobien. En outre, c'est par l'approche à composants logiciels, mise en œuvre dans CADES, que sont plus spécifiquement pris en compte les couplages dynamiques en question. Les perspectives ouvertes par ces travaux vont de la conception robuste et fiable de systèmes, à la commande optimale en temps réel, en s'appuyant sur des méthodologies de modélisation, de capitalisation et de réutilisation collaborative des connaissances, en exploitant au mieux Internet et les technologies logicielles.

**Mots clés :** Conception ; Système ; Modélisation ; Magnétique ; Optimisation, Composant logiciel ; MEMS, Bâtiment intelligent.

## Abstract

It is through a range of electrical engineering design applications, from my research and doctoral supervisions, which is illustrated a problem inherent in the "system design", the couplings. They are involved in the definition of system models (multi-physics, multi-formalisms, multi-levels ...) but also at the level of possible analysis on this system (dynamic simulation, sensitivity analysis, constrained optimization, robustness , ...). This complex nature is associated with the dynamic nature of system design, in the sense that the couplings arise during the process. These two characters leads to the challenge of appropriate CAD tools, that I face in trying to meet a range of issues described in this report. To do this, we have, in my research team, CADES software framework. It is both our experimental platform and the receptacle of methodologies that we value in education and industry. My contributions to this framework are primarily methodological, but also applicative, in the field of magnetic MEMS and smart buildings. They are mainly oriented towards the constrained optimization, in particular by dedicated modeling formalisms and methods for automatic generation of Jacobian computation. In addition, it is through the approach of software components, implemented in CADES, that dynamic coupling is specifically taken into account. The prospects opened by this work range from robust and reliable systems, real time optimal control, based on modeling methodologies, capitalization and collaborative reuse of knowledge, making best use of Internet and software technologies.

**Keywords :** Design ; System ; Modelling ; Magnetic ; Optimization, Software component ; MEMS, Smart building.



## Introduction

Ce document présente, sous l'angle de vue des « couplages », mes travaux de recherche et d'encadrement de recherche. Ce point de vue ne me permet pas de présenter mes travaux de manière précise mais permet de balayer mes différentes thématiques en suivant un fil conducteur commun. Par ailleurs, ce fil conducteur me permet d'aller au delà des travaux de chacun des doctorants que j'ai co-encadré en définissant des stratégies plus amonts pour des aspects tels que la capitalisation des modèles ou la mise en œuvre aisée et rapide de stratégies de conception.

Il se décompose en 4 parties en commençant par dresser le constat de l'omniprésence de couplages dans les différents travaux menés.

La première partie fait donc ce constat de couplages, tout d'abord concernant les modèles, issus de différentes physiques, de différents modélisateurs, exploitant différentes méthodes, qu'il est nécessaire de coupler pour atteindre une modélisation tenant compte des contraintes de conception. Ces contraintes sont généralement associées aux performances du composant, aux limites technologiques qu'il doit respecter ou à son intégration dans un système ou un environnement. On imagine bien aujourd'hui qu'une conception globale devra tenir compte en même temps des contraintes individuelles de chaque composant, mais aussi, et de plus en plus, des contraintes « systèmes » issues des couplages. Pour réaliser ces couplages, les modélisateurs mettent en place ou exploitent les formalismes les mieux adaptés à leur problème. Ce premier bilan montre qu'il existe de nombreux formalismes de modélisation répondant chacun à différents besoins, et qu'il est nécessaire de les considérer comme potentiellement composables.

Un autre type de couplage apparaît également pour les besoins de l'analyse de ces modèles. En effet, la modélisation n'est qu'une étape intermédiaire pour atteindre un but tel que la compréhension de phénomènes par la simulation, l'analyse de sensibilité paramétrique, le dimensionnement, l'optimisation, etc. Et la nature des modèles diffère si ces études sont menées en amont d'un processus de conception ou dans une phase finale de conception détaillée. Ce bilan met alors en avant les formalismes que doivent respecter les modèles pour ces différents cas d'analyse.

La seconde partie propose une prise de recul en analysant les enjeux d'une CAO si nous souhaitons qu'elle puisse supporter les différents cas d'études présentés en première partie. C'est en particulier sur les caractères complexe et dynamique de la conception des systèmes que s'appuie ma réflexion. Ainsi se dégage le besoin de différents formalismes informatiques pour le support de nos modèles, avec lesquels nous devons interagir de manière dynamique pour les construire et les reconstruire à volonté. Y sont développés quelques paradigmes informatiques pouvant répondre à nos besoins, tels que les composants logiciels et les approches orientés services. Ces concepts issus de l'informatique nous permettent de repenser nos méthodes de travail et nous ouvrent de nouvelles voies, en particulier grâce à Internet, pouvant favoriser l'échange et donc la synergie entre modélisateurs, concepteurs, intégrateurs système, et autres relations client/fournisseurs.

La troisième partie présente l'environnement CADES que je co-développe avec d'autres chercheurs et qui est le réceptacle de nos propositions méthodologiques. En particulier, il s'appuie sur une architecture où les modèles de calcul deviennent des composants logiciels, nous permettant ainsi de valider les approches par formalismes « boîte blanche » et « boîte noire ». Cet environnement nous permet de mettre en œuvre un grand nombre de couplages, comme celui de la composition de modèles (de dimensionnement, dynamiques, ...), ou encore du couplage des modèles est des outils d'analyse. La norme de composant que nous proposons permet par exemple d'exécuter des modèles dans d'autres environnements comme Matlab, Excel, Portunus,



Dymola, iSight, ... mais permet également de contenir des modèles issus d'autres environnements comme Modelica, Matlab, Flux, etc... CADES constitue certes un support à notre recherche mais il est également pour nous un moyen de valorisation de nos travaux. C'est en particulier grâce à ses capacités de modélisation métier et d'optimisation que CADES est aujourd'hui utilisé par de nombreux partenaires industriels et universitaires et que la société VESTA-SYSTEMS le développe à nos côtés et l'exploite commercialement.

Enfin, la dernière partie de ce rapport est consacrée aux perspectives et projets de recherche à court et moyen terme. A l'origine un framework pour l'optimisation (statique) de modèle en génie électrique, CADES s'oriente progressivement vers une couverture applicative plus large, en intégrant en particulier les problématiques des systèmes multiphysiques (bâtiment). Dans ce cadre applicatif, de nouveaux besoins émergent, comme celui de disposer de composants métiers (composant MUSE), de travailler sur le contrôle optimal (optimisation dynamique) et de travailler en réseau collaboratif.

Pour clore ce rapport et afin de situer ce travail dans son contexte global, un document annexe comprend une notice individuelle me concernant, mes travaux d'encadrement de recherche, la liste de mes publications, mes activités d'enseignement et mes responsabilités pédagogiques, scientifiques et administratives.

# Sommaire

1	Omniprésence de couplages .....	9
1.1	Axe horizontal : composition de modèles .....	9
1.2	Axe vertical : couplages des modèles aux outils d'analyse.....	23
2	Enjeux scientifiques de la CAO en ingénierie électrique.....	41
2.1	Utilisation conjointe de méthodes/outils complémentaires .....	41
2.2	Sur la nature des modèles.....	41
2.3	Sur la nature de la conception.....	43
2.4	Les enjeux des environnements de CAO.....	44
2.5	Les paradigmes successifs d'objets, de composants et de services .....	47
2.6	Vers le « cloud computing ».....	51
3	CADES : Un environnement pour le couplage de modèles et d'outils d'analyse.....	55
3.1	L'Histoire.....	55
3.2	Une architecture modulaire.....	55
3.3	Le langage de modélisation SML .....	57
3.4	Les composants logiciels ICAr.....	60
3.5	L'optimisation .....	63
3.6	La simulation dynamique.....	65
4	Recherches en cours et futures.....	71
4.1	Synergie avec Vesta-Systems.....	71
4.2	Vers les prochaines générations de méthodes et d'outils .....	72
5	ANNEXES .....	77
5.1	Résumé de curriculum vitae .....	77
5.2	Résumé des encadrements de travaux de recherche .....	78
5.3	Encadrements : modélisation en électromagnétisme et applicatifs microsystèmes.....	78
5.4	Encadrements : simulation dynamique de systèmes et applicatifs bâtiment.....	87
5.5	Projets en cours, partenaires et financements associés .....	90
5.6	Fonctions d'intérêts collectifs .....	90
5.7	Publications .....	91
5.8	Enseignements.....	96

# Sommaire détaillé

1	Omniprésence de couplages .....	9
1.1	Axe horizontal : composition de modèles .....	9
1.1.1	Composants magnétiques .....	9
1.1.1.1	Formalismes circuit .....	9
1.1.1.2	Identification de circuit équivalent .....	12
1.1.1.3	Modèles magnétiques non canalisés .....	14
1.1.2	Une multitude de compositions .....	17
1.1.2.1	Multi-méthodes .....	17
1.1.2.2	Multi-physiques .....	18
1.1.2.3	Multi-processeurs .....	19
1.1.2.4	Multi-temporel .....	20
1.2	Axe vertical : couplages des modèles aux outils d'analyse .....	23
1.2.1	Analyse du modèle .....	23
1.2.1.1	Principe général d'analyse .....	23
1.2.1.2	Analyse dynamique .....	23
1.2.1.3	Analyse de sensibilité .....	24
1.2.2	Optimisation .....	26
1.2.2.1	Principe général de l'inversion de modèle .....	26
1.2.2.2	Dimensionnement .....	28
1.2.2.3	Identification .....	29
1.2.2.4	Réduction de modèle .....	30
1.2.2.5	Hybridation d'algorithme d'optimisation .....	32
1.2.2.6	Optimisation multi-niveaux .....	32
1.2.2.7	Robustesse et fiabilité .....	35
2	Enjeux scientifiques de la CAO en ingénierie électrique .....	41
2.1	Utilisation conjointe de méthodes/outils complémentaires .....	41
2.2	Sur la nature des modèles .....	41
2.2.1	Du modèle du produit aux modèles de conception .....	41
2.2.2	Compromis précision / temps de calcul .....	41
2.2.3	Modélisation analytique / numérique .....	42
2.2.4	Capitalisation / Réutilisation de connaissances .....	43
2.3	Sur la nature de la conception .....	43
2.3.1	Le système « conception » .....	43
2.3.2	Complexité du système « conception » .....	44

2.3.3	Dynamique du système « conception ».....	44
2.4	Les enjeux des environnements de CAO.....	44
2.4.1	Les complémentarités nécessitent les couplages .....	44
2.4.2	Couplages faibles / forts.....	45
2.4.3	Approche générative – Approche guidée par les modèles (MDA) .....	46
2.4.4	Des compétences informatiques nécessaires .....	47
2.5	Les paradigmes successifs d’objets, de composants et de services .....	47
2.5.1	3 niveaux hiérarchiques.....	47
2.5.2	Des objets aux composants.....	47
2.5.3	Des architectures orientées services aux composants orientés services .....	49
2.6	Vers le « cloud computing ».....	51
2.6.1	Rappel historique .....	51
2.6.2	Internet.....	51
2.6.3	Dématisation .....	51
2.6.4	Conception distribuée mais collaborative.....	51
3	CADES : Un environnement pour le couplage de modèles et d’outils d’analyse.....	55
3.1	L’Historique.....	55
3.2	Une architecture modulaire.....	55
3.2.1	CADES « standard ».....	56
3.2.2	CADES « métier ».....	56
3.2.3	CADES Plug’in .....	56
3.3	Le langage de modélisation SML .....	57
3.3.1	Modélisation analytique / algorithmique.....	57
3.3.2	Des boites multicolores.....	58
3.3.3	Composition « boîte grise » .....	59
3.4	Les composants logiciels ICAr.....	60
3.4.1	ICAr : une norme de composants multifacettes.....	60
3.4.2	Découverte dynamique des services offerts par le composant .....	60
3.4.3	Du générateur métier à l’application métier.....	61
3.4.4	Bus logiciel à base de composants pour assurer l’interopérabilité.....	62
3.5	L’optimisation .....	63
3.5.1	Dimensionnement sous contraintes.....	63
3.5.2	Calcul de Jacobien.....	64
3.5.3	Facette « JacobianSolver » d’ICAr .....	64
3.5.4	Composition des dérivées.....	64
3.5.5	Algorithmes d’optimisation .....	65

3.6	La simulation dynamique.....	65
3.6.1	Contexte de recherche.....	65
3.6.2	Modèles dynamiques ODE .....	65
3.6.3	Modèles dynamiques DAE.....	67
3.6.4	Génération de composants ICAr dynamiques.....	67
3.6.5	Simulation couplée, simulation système .....	67
4	Recherches en cours et futures.....	71
4.1	Synergie avec Vesta-Systems.....	71
4.2	Vers les prochaines générations de méthodes et d'outils .....	72
4.2.1	Vers des formalismes multi-métiers .....	72
4.2.2	Vers l'optimisation robuste et fiable .....	73
4.2.3	Vers l'optimisation dynamique.....	73
4.2.4	Vers la commande optimale de systèmes .....	73
4.2.5	Une synergie forte.....	74
4.2.6	Vers les réseaux collaboratifs .....	74
5	ANNEXES .....	77
5.1	Résumé de curriculum vitae.....	77
5.2	Résumé des encadrements de travaux de recherche .....	78
5.3	Encadrements : modélisation en électromagnétisme et applicatifs microsystèmes.....	78
5.3.1	Conception de composants électromagnétiques (4 thèses soutenues).....	78
5.3.2	Valorisation et extension de l'approche (2 masters, 1 thèse).....	85
5.3.3	Hybridation avec le calcul numérique (1 master, 1 thèse).....	86
5.4	Encadrements : simulation dynamique de systèmes et applicatifs bâtiment.....	87
5.4.1	Couplages de modèles en électromagnétisme (2 thèses).....	87
5.4.2	Multi-physique appliquée au bâtiment (2 masters, 3 thèses) .....	88
5.4.3	Développements informatiques.....	89
5.5	Projets en cours, partenaires et financements associés .....	90
5.6	Fonctions d'intérêts collectifs .....	90
5.7	Publications .....	91
5.8	Enseignements .....	96
5.8.1	Matières enseignées.....	96
5.8.2	Volumes horaires .....	96
5.8.3	Responsabilités pédagogiques et administratives .....	96
5.8.4	Liens enseignement / recherche.....	96



---

<b>1</b>	<b>Omniprésence de couplages .....</b>	<b>9</b>
1.1	Axe horizontal : composition de modèles .....	9
1.1.1	Composants magnétiques.....	9
1.1.1.1	Formalismes circuit.....	9
1.1.1.2	Identification de circuit équivalent .....	12
1.1.1.3	Modèles magnétiques non canalisés .....	14
1.1.2	Une multitude de compositions .....	17
1.1.2.1	Multi-méthodes.....	17
1.1.2.2	Multi-physiques.....	18
1.1.2.3	Multi-processeurs .....	19
1.1.2.4	Multi-temporel.....	20
1.2	Axe vertical : couplages des modèles aux outils d'analyse.....	23
1.2.1	Analyse du modèle .....	23
1.2.1.1	Principe général d'analyse .....	23
1.2.1.2	Analyse dynamique.....	23
1.2.1.3	Analyse de sensibilité .....	24
1.2.2	Optimisation.....	26
1.2.2.1	Principe général de l'inversion de modèle .....	26
1.2.2.2	Dimensionnement.....	28
1.2.2.3	Identification.....	29
1.2.2.4	Réduction de modèle .....	30
1.2.2.5	Hybridation d'algorithme d'optimisation.....	32
1.2.2.6	Optimisation multi-niveaux .....	32
1.2.2.7	Robustesse et fiabilité .....	35

# 1 Omniprésence de couplages

Dans cette partie, je souhaite introduire une problématique commune à tous mes travaux. Comme le montre la Figure 1-1, il s'agit tout d'abord de présenter le besoin de coupler les modèles entre eux sur un axe horizontal, puis celui de coupler les modèles à des outils d'analyse tels que des algorithmes de simulation ou d'optimisation, sur un axe vertical. Dans les deux cas, l'objectif est de souligner la diversité des modèles et des formalismes existants, et donc des outils logiciels associés. Les exemples illustratifs suivants, extraits de mes travaux de recherche et d'encadrement, ne constituent pas une présentation de ceux-ci, mais visent à mettre en avant une vision globale liée à mes travaux.

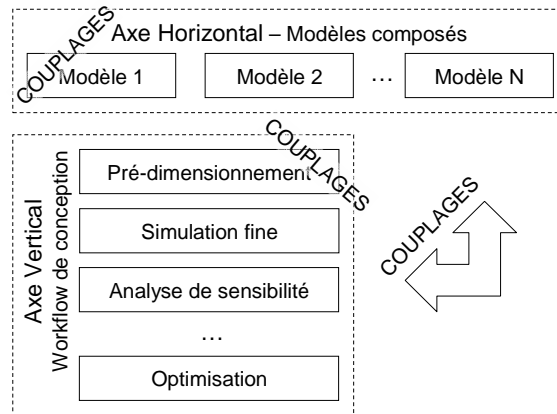


Figure 1-1 : Axe horizontal / Axe vertical, des couples multiples

## 1.1 Axe horizontal : composition de modèles

### 1.1.1 Composants magnétiques

Nous allons voir ici différentes formalisations d'un composant magnétique selon la méthode de modélisation utilisée. Chaque méthode étant plus ou moins bien adaptée aux spécifications du dispositif et à son usage. Les spécifications de ces formalismes rendent possible la mise en œuvre informatique des couplages pour définir un système par composition.

#### 1.1.1.1 Formalismes circuit

La modélisation par couplage de composant électromagnétique dans le cas où le flux magnétique est conduit, ou canalisé par un circuit magnétique, autorise l'hypothèse de lignes de champs parallèles et conduit à des modèles simplifiés. Ce cas trouve son illustration avec la modélisation par réseaux de reluctances (ou perméances). L'idée étant de définir les interactions entre éléments par une analogie électrique faisant en particulier correspondre la loi d'Ampère ( $F = \mathfrak{R} \cdot \Phi$ ) à la loi d'Ohm ( $U = \mathfrak{R} \cdot I$ ). La grandeur de flux magnétique serait donc associée au courant électrique (flux d'électrons), la grandeur de force magnétomotrice serait associée à la force électromotrice, et la reluctance serait associée à la résistance. Cette analogie est généralisée à la multi-physiques par les graphes de liens [1][2] ou « bond graph » dans lesquels sont définis les grandeurs actives « effort » (tension, force, pression, température, ...) et « flux » (courant, vitesse, débit, flux entropique, ...), et des éléments passifs que sont l'élément dissipatif (résistance, frottement, ...), et les éléments de stockage inertiel « I » (inductance, masse, ...) et stockage capacitif « C » (capacité, ressort, ...) [3]



Domain	Effort Variable	Flow Variable	Effort · Flow Product
Electrical	Voltage {V}	Current {A}	Power {V · A} ≡ {W}
Hydraulic	Pressure {N/m <sup>2</sup> }	Volume flow {m <sup>3</sup> /s}	Power {N · m/s} ≡ {W}
Rectilinear mechanical	Force {N}	Velocity {m/s}	Power {N · m/s} ≡ {W}
Rotating mechanical	Torque {N · m}	Angular velocity {rad/s} ≡ {s <sup>-1</sup> }	Power {N · m/s} ≡ {W}
Magnetic (traditional)	mmf {A}	Magnetic flux {Wb} ≡ {V · s}	Energy {V · A · s} ≡ {J}
Magnetic (alternative)	mmf {A}	Magnetic flux rate {Wb/s} ≡ {V}	Power {V · A} ≡ {W}

Figure 1-2 : Variables effort/flux dans différents domaines physiques [3]

On s'aperçoit qu'en définissant la grandeur « flux » par le flux magnétique, le produit effort-flux correspond à une énergie et non une puissance (Figure 1-2). Il s'agit alors d'une représentation « pseudo » graphe de liens. Pour coller parfaitement à la définition des graphes de lien, la grandeur « flux » est définie comme la variation de flux magnétique ( $d\Phi/dt$ ). La réluctance n'est donc pas un élément dissipatif équivalent à la résistance électrique mais la perméance ( $P=1/R$ ) correspond à un élément de stockage capacitif ( $\mathfrak{R} \equiv 1/C$ ) puisque

$$\dot{\Phi} = \frac{1}{\mathfrak{R}} \cdot \frac{dF}{dt}.$$

Magnetic Circuit			Electrical Circuit		
mmf	$F$	{A}	Voltage	$v$	{V}
Flux rate	$\dot{\Phi}$	{V}	Current	$i$	{A}
Permeance	$\mathcal{P}$	{H}	Capacitance	$C$	{F}
Flux	$\Phi = \int \dot{\Phi} dt$	{Wb}	Charge	$q = \int i dt$	{C}
Permeability	$\mu = \mu_0 \mu_r$	{H/m}	Permittivity	$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$	{F/m}
Power	$P = F \dot{\Phi}$	{W}	Power	$P = vi$	{W}
Energy	$E = \int F d\Phi$	{J}	Energy	$E = \int v dq$	{J}

Figure 1-3 : Equivalence électrique / magnétique en « vrai » graphe de lien [3]

Ainsi, en calculant des reluctances à partir des tubes de flux, il est possible de décrire un circuit électrique équivalent, de le coupler avec d'autres physiques ramenées dans ce formalisme, puis de résoudre le système afin de déterminer les grandeurs magnétiques correspondantes. Ce formalisme a été mis en œuvre dans mon équipe dans l'outil Reluctool [4][5], travaux dirigés par mes 2 collègues Frédéric Wurtz et Laurent Gerbaud. Tandis que Reluctool est dédié à l'optimisation, des solutions plus généralistes existent, mais sont dédiées à la simulation. C'est le cas par exemple du langage MODELICA<sup>1</sup>, avec lequel nous travaillons dans la thèse de Sana GAALOUL [6], permettant de définir des compositions comme l'illustre la Figure 1-4.

<sup>1</sup> MODELICA : langage pour la simulation dynamique multiphysique comportementale (modelica.org)

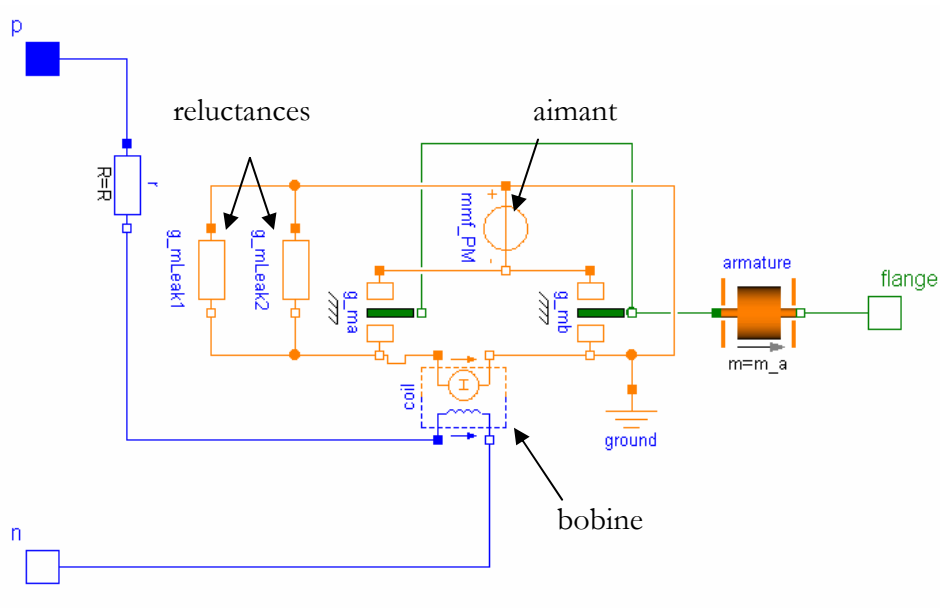


Figure 1-4 : Composition électrique/magnétique/mécanique modélisation un actionneur électromagnétique dans le logiciel Dymola (langage MODELICA)

Dans [8], suite aux travaux de master de TRAN VAN Truc, nous avons proposé une modélisation d'un contacteur (Figure 1-5) par réseau de reluctance (Figure 1-6) dans le but de disposer d'un modèle complètement paramétré à partir de la géométrie. La difficulté majeure de définir un modèle paramétré provient des modifications possibles de trajectoires de flux et donc de la topologie du circuit, ce qui est le cas dans l'exemple du contacteur décalé latéralement.

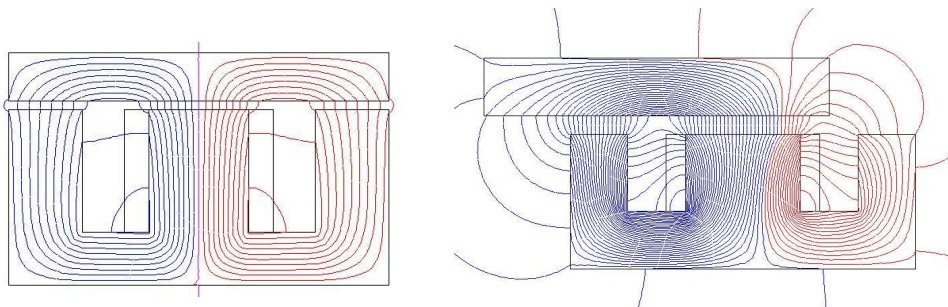


Figure 1-5 : Contacteur en "E" en position centrale (fuites faibles) et en position décalée (fuites importantes)

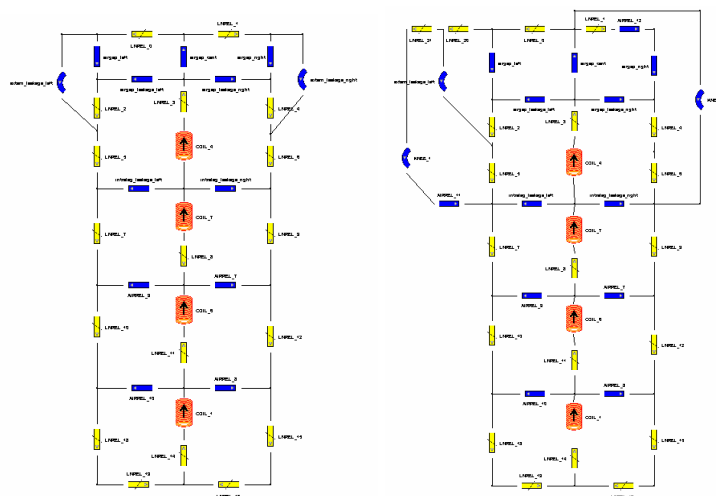


Figure 1-6 : Réseaux de reluctances du contacteur en "E" dans le logiciel Reluctool, en position centrale (fuites faibles) et en position décalée (fuites importantes)

Nous montrons dans ce master les limites du formalisme par composants magnétiques reluctants et proposons une approche alternative basée sur l'hybridation des réseaux de réductance avec des méthodes intégrales de frontière. Cette méthode offre des résultats plus précis que les réseaux de réductance, moins rapides en temps de calcul, mais plus rapide à mettre en œuvre.

Donc, lorsque les fuites sont difficiles à exprimer par des reluctances, il est nécessaire de définir des composants d'une granularité supérieure. Ces différents niveaux de granularités doivent ensuite être composés. Cette composition peut par exemple s'exprimer dans le langage MODELICA, illustré ci-dessous pour la simulation d'une association convertisseur-machine [9], ou dans le langage VHDL-AMS<sup>2</sup> avec lequel nous travaillons dans la thèse d'Abir REZGUI [10], dans lesquels il est possible d'hybrider la notion de ports énergétiques avec des d'entrées/sorties non typées offrant une ouverture pour pallier les limites d'un unique formalisme.

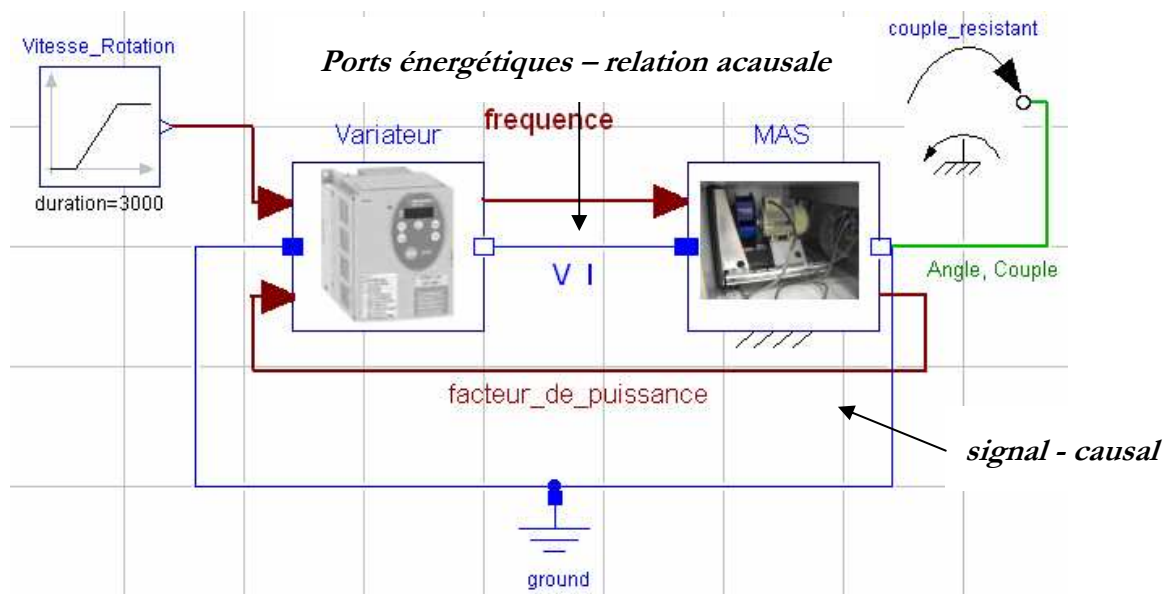


Figure 1-7 : Composition de modèles électromagnétiques par couplages causaux et acausaux en Modelica

### 1.1.1.2 Identification de circuit équivalent

Dans la thèse d'Abdeladi BESRI [12], THALES Aerosystems nous avait confié la tâche de modéliser un transformateur planar (technologie par circuit imprimé) de 8kVA fonctionnant à 125kHz dont le rendement est supérieur à 99%. Sa modélisation a été réalisée sur le principe de la décomposition en couches empilées, lesquelles peuvent être déroulées et représentées par des plaques rectangulaires soumises à un champ électromagnétique transverse (onde plane d'axe de propagation  $z$ , cf. Figure 1-8) et connectée électriquement à un circuit induisant un champ électrique longitudinal (axe  $x$ ).

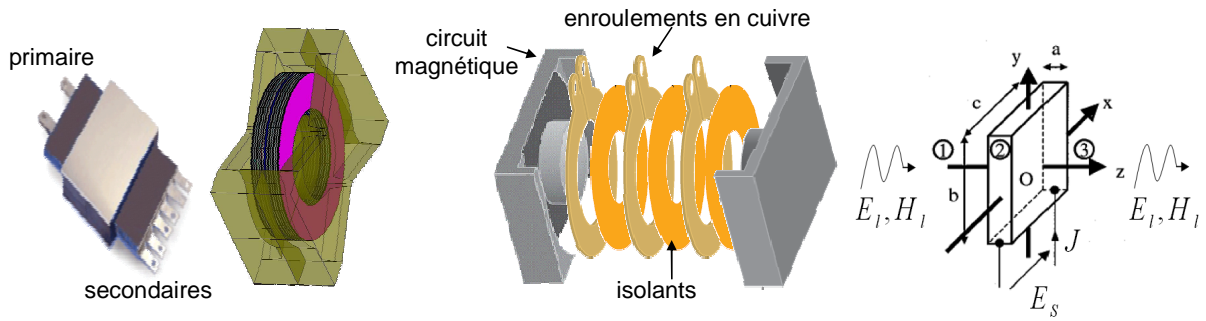


Figure 1-8 : Description d'un transformateur planar et de sa décomposition en couches empilées.

Cette modélisation est basée sur une approche de décomposition dans laquelle les interactions entre plaques ont été spécifiées (magnétique et électrique), permettant ainsi une modélisation systématique basée sur des composants élémentaires et leur composition [13]. Le modèle d'une couche de matériaux conducteur peut être défini sous la forme d'un schéma électrique équivalent composé d'un ensemble d'impédances complexes, et en particulier de l'impédance « B » (Figure 1-9) dont nous reparlerons plus loin de l'identification. Une fois ces impédances identifiées, le schéma d'une plaque peut être défini comme un composant (quadripôle) dans un logiciel circuit tel que PSpice (Figure 1-9), puis instancié autant de fois qu'il y a de couches pour simuler le système grâce à une composition récursive (Figure 1-10).

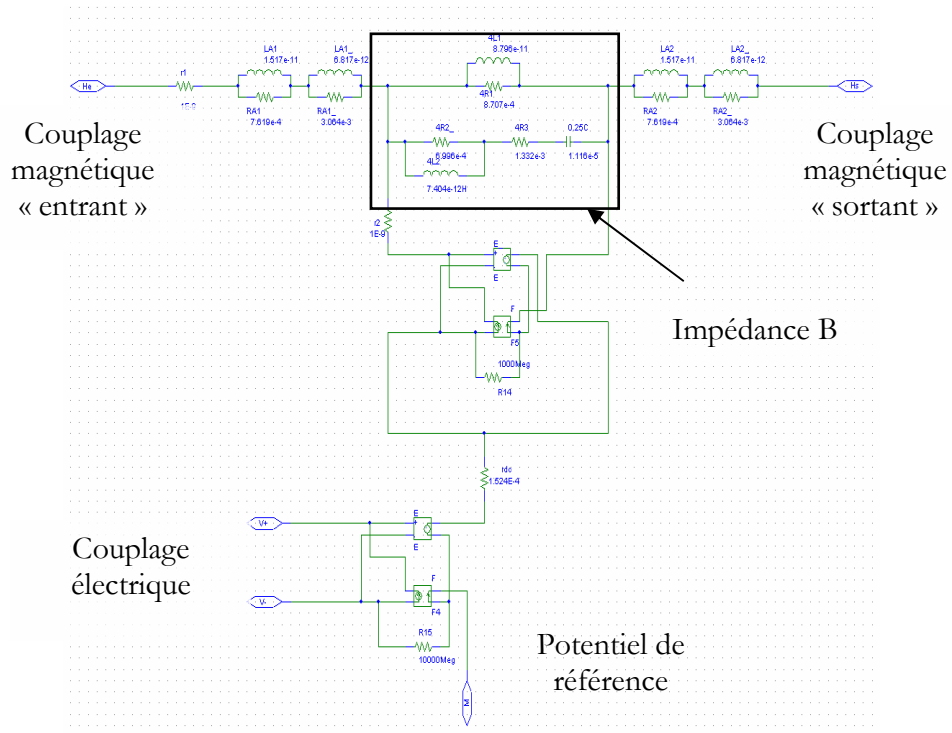


Figure 1-9 : Schéma électrique équivalent d'une couche de matériaux conducteur.

La figure suivante montre alors le circuit électrique équivalent du transformateur avec le couplage des 38 couches représentant un modèle complet d'environ 1500 constantes localisées. Nous voyons alors dans cette approche un formalisme circuit de plus bas niveau permettant d'exploiter la notion de modèle de composant, pouvant être instancié et composé de manière récursive. Ce formalisme, issu de l'électronique, est de plus en plus utilisé en modélisation et nous verrons dans les parties suivantes qu'il peut être étendu et généralisé.

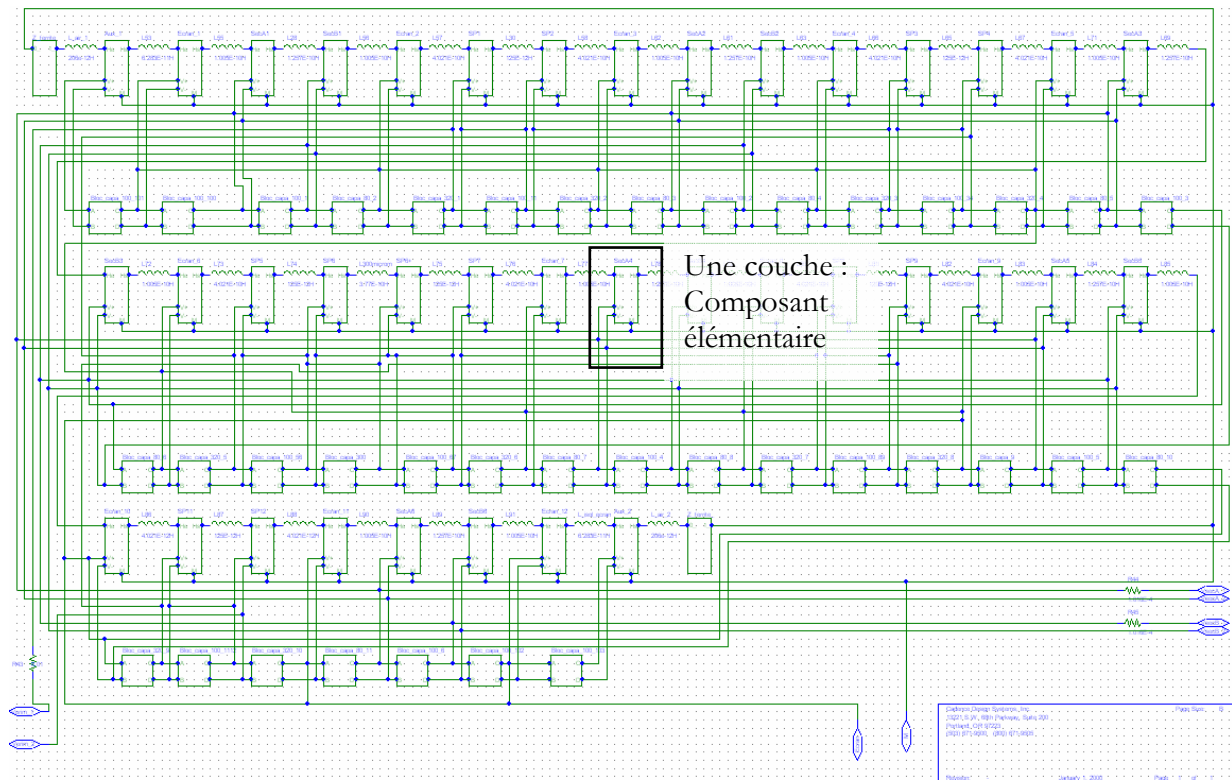


Figure 1-10 : Circuit électrique équivalent du transformateur avec le couplage des 38 couches.

### 1.1.1.3 Modèles magnétiques non canalisés

Lorsque le dispositif ne permet pas de définir des tubes de flux, les approches précédentes ne peuvent s'appliquer. C'est par exemple le cas dans les microsystèmes où la réalisation de circuits magnétiques est un déficit technologique. Nous avons développé dans ce cadre le logiciel MacMMems mettant en œuvre une approche d'interactions entre éléments magnétiques, basée sur une formulation intégrale [14]. Brièvement, il s'agit de décrire des composants pouvant :

- réagir à un champ magnétique externe
- créer des forces et des couples mécaniques
- créer un champ magnétique

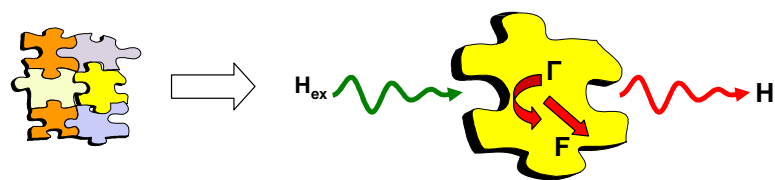
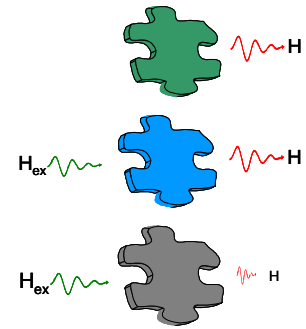


Figure 1-11 : Description d'un composant magnétique dans le logiciel MacMMems.

3 classes d'éléments ont été définies :

- Des sources de champ magnétique (aimants, conducteurs)
- Des matériaux ferromagnétiques doux
- Des matériaux diamagnétiques et paramagnétiques (champ induit négligé)



Une bibliothèque d'éléments a été constituée à partir de modèles analytiques de calcul de champ. Le calcul de champ créé par des conducteurs s'appuie sur la loi de Biot et Savart conduisant à des calculs d'intégrale volumique. Le calcul de champ créé par des aimants s'appuie sur une approche coulombienne (charge équivalente) et revient en général à un calcul d'intégrale surfacique, parfois volumique.

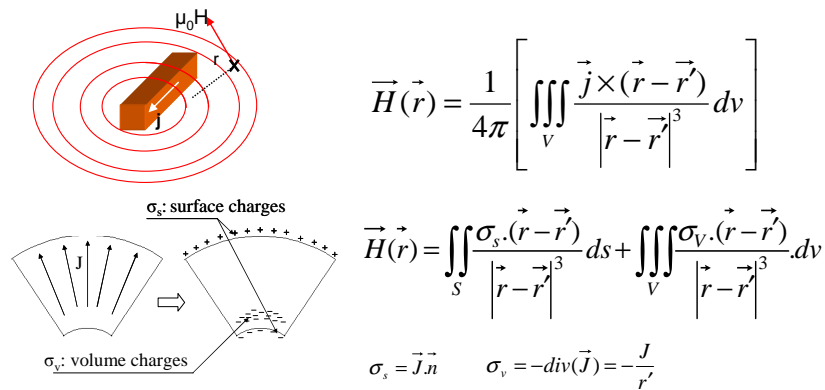


Figure 1-12 : Biot et Savart pour les conducteurs, Approche Coulombienne pour les aimants

Ces calculs, dans le cas de géométries simples (pavés, cylindres, ...), peuvent être conduits symboliquement et donnent des formules dites « analytiques » [15][16][19].

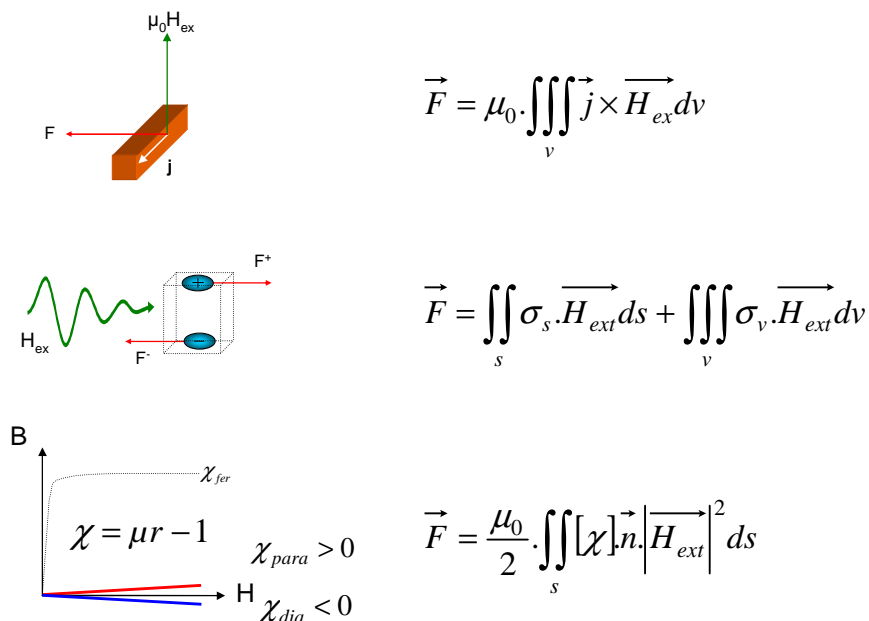


Figure 1-13 : Force de Laplace pour les conducteurs, Approche Coulombienne pour les aimants, champ induit négligé pour les dia et paramagnétiques

Les calculs de force et de couple dans certains cas peuvent également être conduits symboliquement [16][17] mais uniquement si la composition est connue à l'avance. Or, dans le cadre d'une méthode de couplage générique, la composition doit être dynamique. De plus, les sources de champs à l'origine d'une force ou d'un couple pouvant être multiples, il peut être préférable de les intégrer toutes numériquement plutôt que d'envisager sommer toutes les intégrales.

Prenons l'exemple d'un micro-actionneur magnétique [20] constitué d'une partie mobile qu'il est possible de faire commuter d'une position haute à une position basse Figure 1-14.

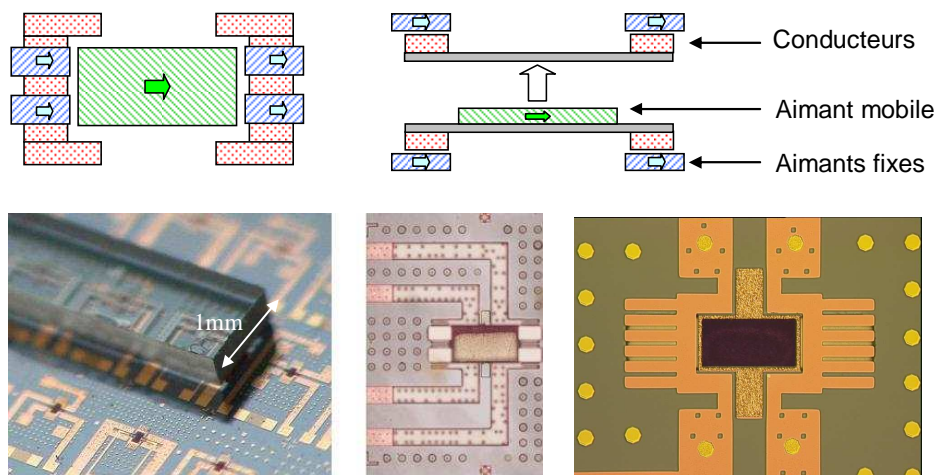


Figure 1-14 : Description du commutateur MEMS magnétique

Les interactions sont définies en fonctions des objectifs, ici calculer la force appliquée sur l'aimant mobile. Le principe est alors que chaque composant fournisse les informations nécessaires (e.g. : équations de calcul du champ en un point de l'espace, équations de calcul de la force en fonction du champ magnétique qui lui est appliqué, ...). Dans notre cas, cela donne :

- Calcul du champ créé par 8 aimants parallélépipédiques (aimants fixes),
- Calcul du champ créé par 12 conducteurs parallélépipédiques.
- Intégration du champ total sur l'aimant mobile pour le calcul de la force verticale.

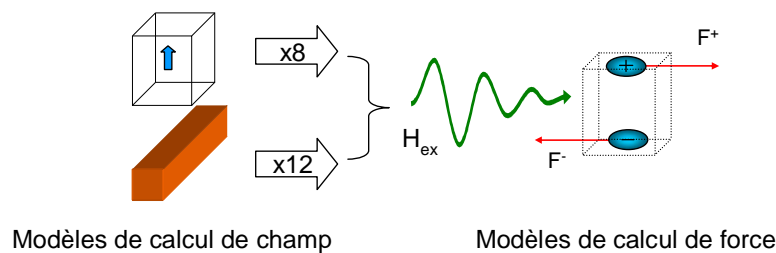


Figure 1-15 : Interactions entre composants élémentaires

Ce principe de modélisation que nous avons développé a été exploité avec succès dans de nombreuses applications de micro-systèmes magnétiques et a donné lieu à de nombreuses collaborations (*voir Annexe 1*).



### 1.1.2 Une multitude de compositions

Nous venons de voir différents formalismes de couplage entre composants définissant un modèle plus global. Nous allons maintenant voir d'autres types d'interactions faisant intervenir des modèles de différentes natures.

#### 1.1.2.1 Multi-méthodes

Les méthodes de modélisation sont multiples. Deux grandes familles s'opposent en générale, les méthodes numériques et analytiques. Il s'agit ici de montrer qu'il peut être intéressant de les réconcilier.

Dans la modélisation du MEMS précédent, un couplage a été volontairement masqué, celui du couplage de techniques numériques et analytiques. En effet, les calculs de source de champs sont réalisés automatiquement de manière symbolique pour les géométries simples (pavés, cylindres, ...), et sont ensuite couplés à des algorithmes numériques travaillant sur un maillage. Ce couplage devient classique dans les logiciels numériques aujourd'hui car les formules analytiques offrent de nombreux avantages, dont la précision, la possibilité de lever des singularités, mais peut induire en contre partie des inconvénients, dont l'instabilité de grosses formules.

Nous voyons donc dans ces exemples que des modèles analytiques ou numériques peuvent être exploités pour modéliser un composant et que le système devra gérer l'interaction de ces modèles de différentes natures (équations, algorithmes, ...). Prenons l'exemple d'un micro actionneur de type « verrou magnétique » (mag-latch) constitué d'un aimant mobile, de conducteurs et d'un matériau ferromagnétique libre en rotation jouant le rôle de contacteur.

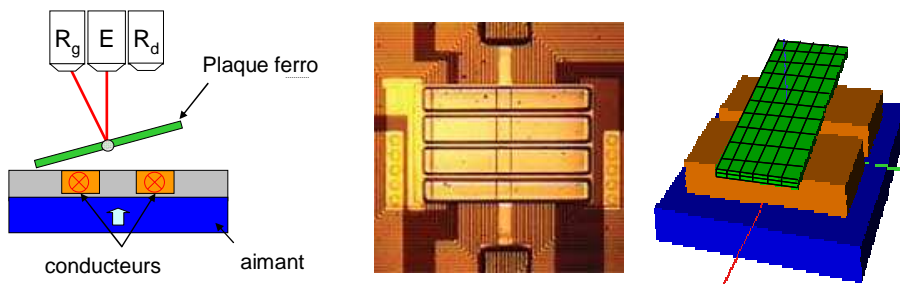


Figure 1-16 : Modélisation Analytique/Numérique d'un verrou magnétique [14]

Les sources de champs sont donc calculées analytiquement (conducteurs et aimant) sur chaque éléments discrétisés de la plaque ferromagnétique. Ce couplage doit être réalisé automatiquement, et valable pour n'importe quelle source de champ (analytique ou numérique). Ensuite, la méthode numérique [21] calcule les aimantations par résolution itératives de systèmes linéaires décrivant l'interaction des aimants les uns par rapport aux autres. Ces matrices peuvent être construites analytiquement, ou par intégration numérique mais avec une correction analytique de la diagonale (interaction propre) [22].

Considérons un autre exemple, la lévitation diamagnétique de cellule ou de gouttelettes d'eau [23](Figure 1-17). Dans le cas des matériaux paramagnétiques ou diamagnétiques, l'hypothèse selon laquelle la réaction du matériau est très faible devant le champ externe, conduit à des modèles analytiques. Or, les outils de modélisation numérique classiques n'exploitent pas cette hypothèse. Nous avons montré qu'ils produisent des modèles coûteux en temps de calcul, et potentiellement entachés d'erreurs numériques non négligeables de plusieurs ordres de grandeur de la solution [24]. La frontière analytique/numérique n'étant généralement pas hermétique, nous avons développé des modèles encore plus légers dans le cas de particules sphériques en exploitant



des approximations multipolaires [25]. Ces différents niveaux de modélisation de la particule diamagnétique peuvent alors être couplés aux autres composants du système à modéliser.

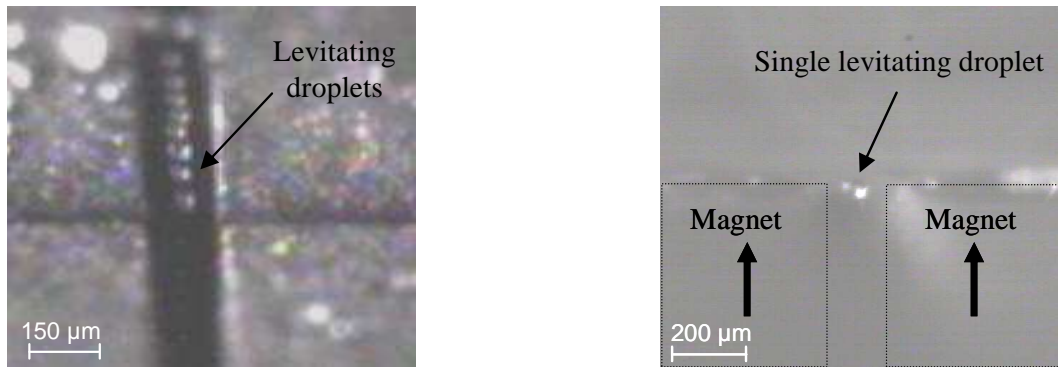


Figure 1-17 : Lévitiation de gouttelette d'eau (diamagnétique) dans l'air au dessus d'aimants.  
Thèse Hichem CHETOUANI [26]

### 1.1.2.2 Multi-physiques

Nous illustrons ici un couplage multiphysique d'un nano-commutateur à actionnement magnétique (Figure 1-18 :).

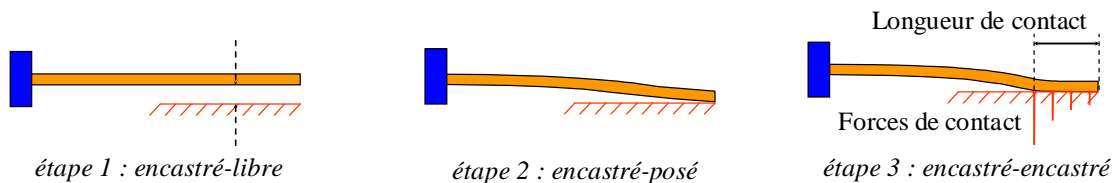


Figure 1-18 : Principe de modélisation de la déformation d'un nano commutateur magnétique.

Une telle modélisation multiphysique peut être réalisée par des méthodes numériques telles que les éléments finis, mais le couplage force magnétique / déformation est relativement délicat. De plus les outils permettant l'étude de déformation avec contact sont peu nombreux. Ainsi, nous ne sommes pas parvenu à réaliser un tel couplage avec les outils spécialisés (ni Ansys, ni Comsol). Deux modélisations ont alors été développées, un modèle semi-analytique [27] dédié à cette structure, ainsi qu'un code purement numérique générique [28].

De plus, des forces nanométriques d'adhésion (force de Casimir, forces de van der Waals) interviennent également dans ce genre de dispositifs à faible dimensions, et qu'il est donc nécessaire de prendre en compte dans le couplage. Cette modélisation a été réalisée dans le même cadre que la modélisation des composants magnétiques non canalisés, implémentée dans le logiciel MacMMems, et a permis d'étendre leur interface de couplage avec la notion de déformation.

Un autre exemple de couplage multi-physique peut être extrait de mes travaux sur l'optimisation de l'efficacité énergétique du bâtiment où interviennent des modèles systèmes multi-physiques, essentiellement thermiques, aérodynamiques et électriques. Par exemple, la simulation d'un système de supervision d'une centrale de traitement de l'air (CTA ou HVAC : Heating Ventilation and Air Conditioning) implique un modèle thermique de l'enveloppe, un modèle de l'équipement HVAC (thermique/électrique/aérodynamique) et un algorithme de régulation. La simulation système peut alors être réalisée de deux manières. La première consiste à prendre chacun des modèles définis dans des logiciels dédiés et de les coupler informatiquement en co-simulation, la deuxième consiste à identifier des modèles plus simples (modèle réduit) décrits dans un même formalisme (équations différentielles, ...) en vue d'un couplage fort [7].

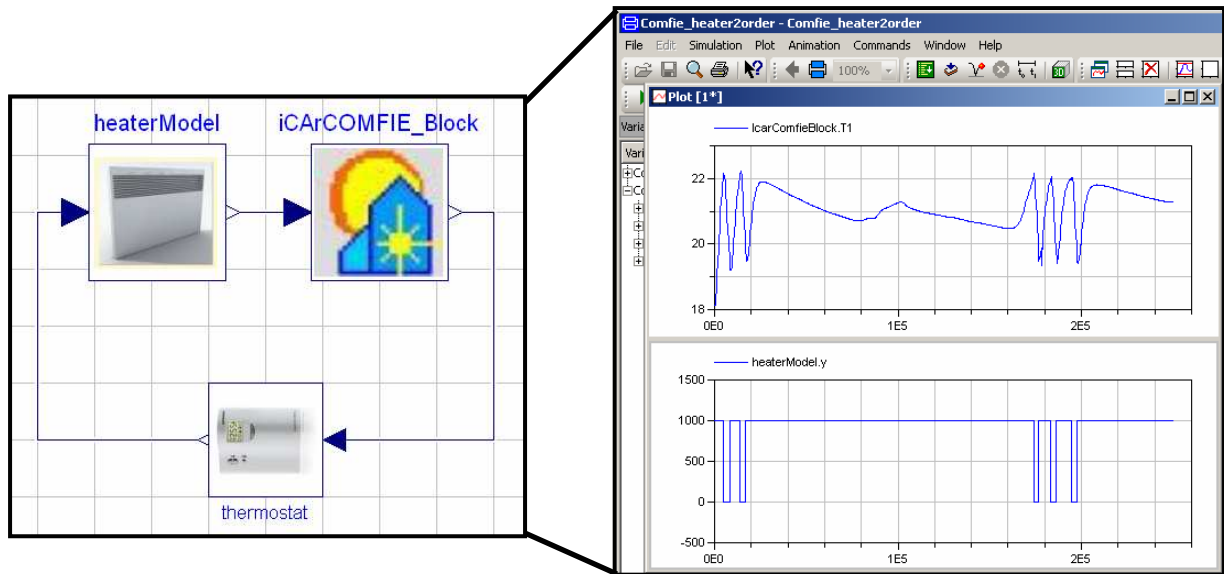


Figure 1-19 : Régulation thermique en Modelica à partir d'un modèle numérique thermique aux dérivées partielles

### 1.1.2.3 Multi-processeurs

Le calcul parallèle peut être nécessaire dans bien des cas d'utilisation que nous illustrerons par la suite comme :

- l'analyse de sensibilité (différence finie, monte carlo, ...)
- l'optimisation sur plusieurs points de fonctionnement contraints,
- l'optimisation par algorithme génétique...

Prenons un simple calcul de sensibilité réalisé par différences finies, c'est-à-dire un calcul de point de fonctionnement et N calculs correspondant à N paramètres du modèle affectés d'une légère variation. Le résultat permettant d'analyser la sensibilité des sorties du modèle pour chaque paramètre et de les trier par ordre d'importance. Ces N+1 calculs parallèles peuvent ensuite faire l'objet d'un nouveau modèle dans un objectif d'optimisation robuste [29]

Prenons un autre exemple, celui du dimensionnement d'un filtre ADSL par rapport à un gabarit fréquentiel [11]. Le gabarit peut être défini par un nombre fini de calculs du modèle à une fréquence fixée. Ainsi, pour dimensionner la courbe fréquentielle à l'intérieur du gabarit, il suffit de réaliser une optimisation avec N contraintes, N étant le nombre de calcul parallèle du modèle. De plus, les résultats font apparaître ici (Figure 1-20) qu'une stratégie d'optimisation hybride intégrant un algorithme génétique (parallélisable) est préférable ce qui accroît l'intérêt de disposer de composition pour le calcul parallèle.

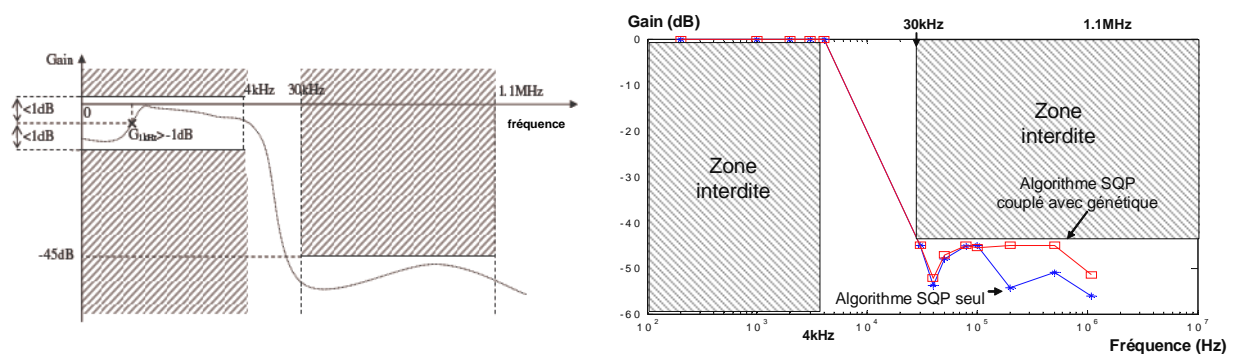


Figure 1-20 : Gabarit fréquentiel définissant les contraintes de conception du filtre ADSL [11]

Les méthodes numériques de modélisation offrent également des capacités de parallélisation. C'est en particulier le cas des méthodes intégrales exploitant des matrices pleines (éléments en interaction totale) dans lesquelles chaque terme est le résultat d'un calcul intégral. Nous étudions, dans la thèse de Christophe Rubeck, des algorithmes de modélisation en électrostatique et magnétostatique permettant d'exploiter les capacités de calcul massivement parallèle des cartes graphiques comme le montrent les résultats suivants [22].

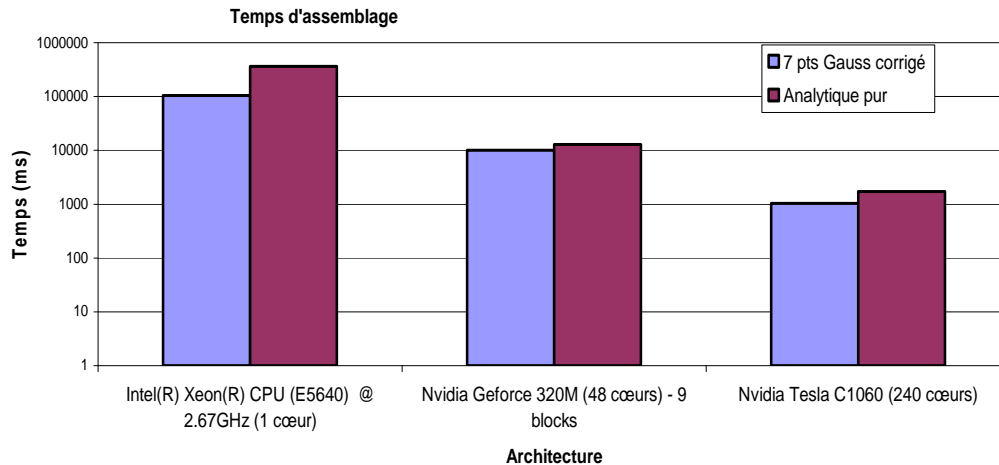


Figure 1-21 : Comparaison des temps de calcul en fonction entre un CPU monoprocesseur et 2 GPU (Graphical Process Unit). Deux types de calculs sont effectués (analytique pur / numérique corrigé analytiquement)

Prenons un dernier exemple plus singulier, celui d'une simulation temporelle où  $N$  calculs peuvent être parallélisés pour réaliser l'intégration temporelle [30]. Ce couplage conduit à une réduction drastique des temps de simulation. La Figure 1-22a illustre le gain en fonction du nombre de processeurs mis en parallèle. La Figure 1-22b ramène le temps de calcul du modèle en fonction de sa distribution. On y voit qu'un calcul non distribué met 5.7s en moyenne alors qu'un calcul distribué met 7s en moyenne, avec une dispersion très faible au delà de 4 ordinateurs. La distribution coûte donc 1.3s supplémentaire, ce qui devient négligeable pour un modèle plus coûteux.

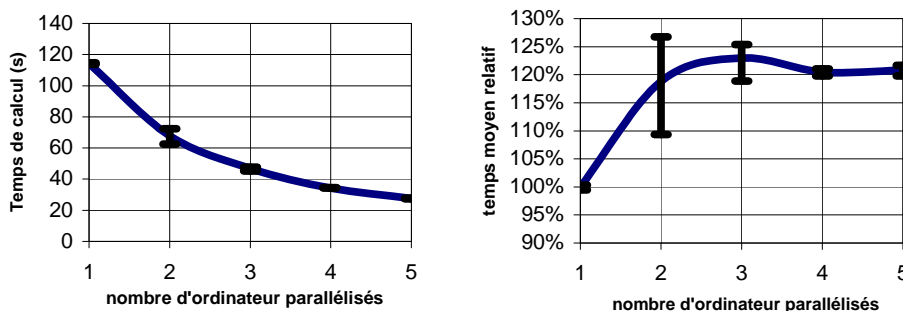


Figure 1-22 : (a) : Temps moyen (avec min/max) du calcul de la force en fonction du nombre d'ordinateurs parallélisés. ; (b) : durée moyenne d'un calcul.

#### 1.1.2.4 Multi-temporel

Prenons un modèle diamagnétique décrit précédemment (composition analytique/numérique) et exploitons le pour modéliser la dynamique de déplacement de la gouttelettes en lévitation (Figure 1-23). Pour cela, il est nécessaire de coupler le modèle de calcul de force (statique) à un modèle de déplacement dynamique de la particule dans un fluide (paramagnétique) et ainsi réaliser une co-simulation.

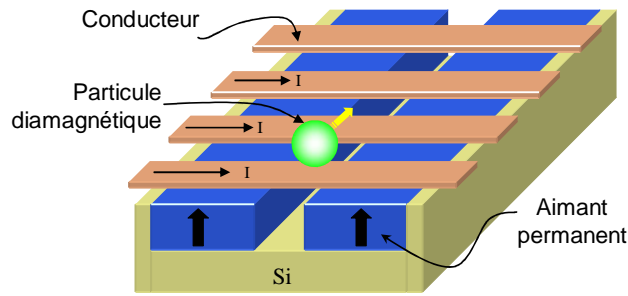


Figure 1-23 : Schéma de principe d'un convoyeur à lévitation diamagnétique + diamagnétophorèse [26]

Ce couplage, entre modèles statiques créés par le logiciel MacMMems et modèles dynamiques décrit dans un outil dédié (e.g. Simulink), est générique et automatisé grâce au formalisme des composants logiciels ICAR que nous avons développé.

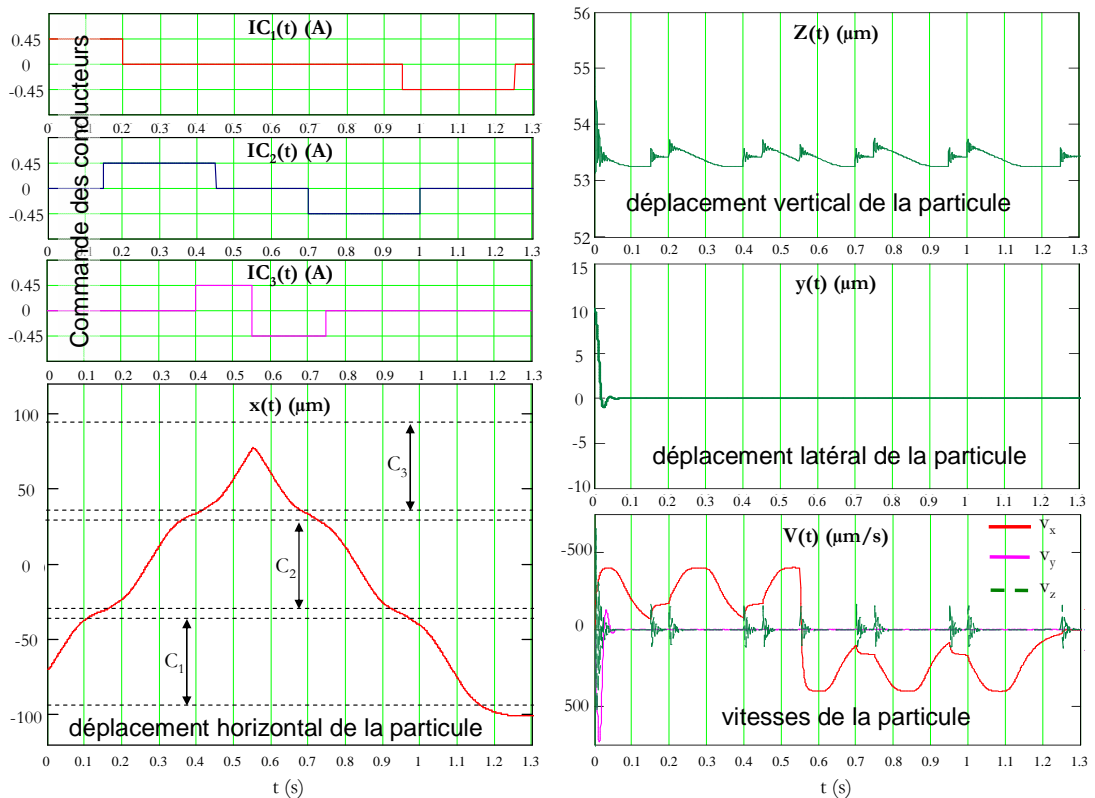


Figure 1-24 : Simulation dynamique d'une particule en lévitation se déplaçant sous l'effet de courants [26]

Un dernier exemple, reprenant l'application multi-physiques bâtiment précédemment décrit, souligne la problématique de couplage lorsque les dynamiques des modèles sont différentes. En particulier, dans l'exemple de régulation de températures, nous avons à faire à des constantes thermiques de l'ordre de l'heure et des événements (instantanés) associés à la régulation. Une telle simulation n'est pas possible si les modèles thermiques sont réutilisés tel que [7]. Soit le modèle thermique est adapté à une simulation couplée événementielle à pas variable (Figure 1-25), soit des stratégies anticipatives ou correctives de co-simulation sont mises en œuvre.

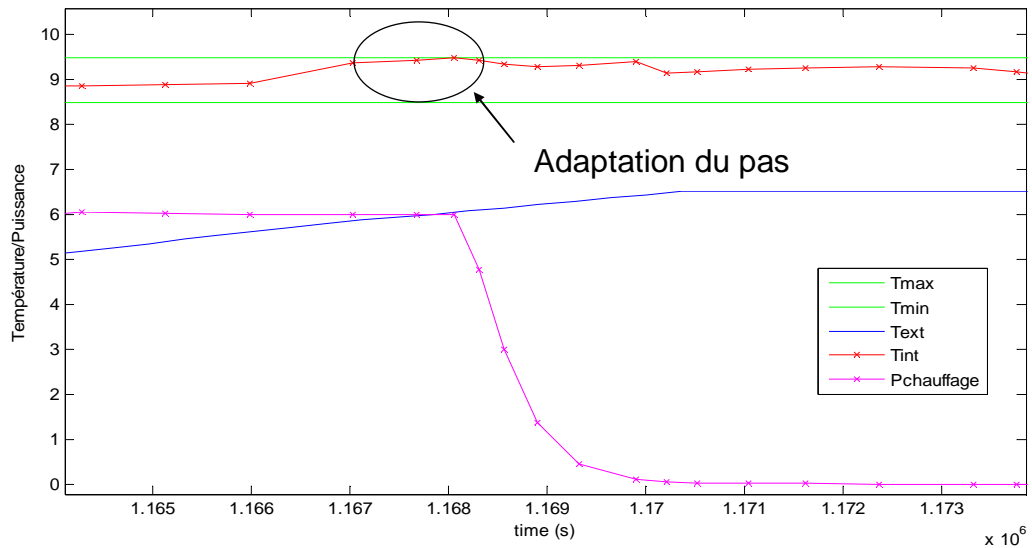


Figure 1-25 :Simulation dynamique thermique/électrique à pas variable.

## Conclusions

Nous avons vu dans cette partie quelques illustrations, tirées de mes travaux et encadrements, de couplages de modèles qui mettent en avant le besoin de bien les gérer. Nous avons également souligné le fait, qu'en fonction de l'utilisation du modèle, des adaptations de formalisme sont parfois nécessaires pour parvenir à un couplage. Selon mon expérience, ce travail de couplage étant un travail récurrent, il est important de pouvoir l'automatiser.

## 1.2 Axe vertical : couplages des modèles aux outils d'analyse

Les couplages précédents visent à produire un modèle par assemblage de modèles complémentaires. Les couplages présentés ici font intervenir un ou plusieurs modèles et des outils de traitement de ces modèles dans un but de modélisation, de simulation, d'optimisation, d'analyse de fiabilité, ...

### 1.2.1 Analyse du modèle

#### 1.2.1.1 Principe général d'analyse

L'analyse du modèle est une phase qui intervient de manière itérative à la création du modèle lui-même. En effet, qu'il s'agisse d'un modèle analytique qui se construit très progressivement ou d'un modèle numérique que l'on vient raffiner au fur à mesure, il est très fréquent d'itérer entre modélisation et calcul du modèle.

Pour calculer un modèle, il est souvent nécessaire de le paramétrer, parfois nécessaire de lui adjoindre un solveur, voir de piloter le modèle pour lui faire calculer plusieurs points de fonctionnement (tracé de courbes nD). Une phase de post-processing intervient alors pour rendre compte à l'utilisateur des grandeurs calculées.

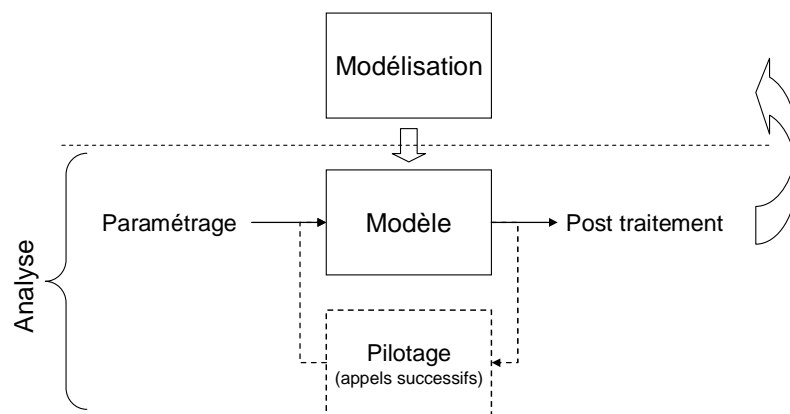


Figure 1-26 : Principe général de modélisation/analyse.

#### 1.2.1.2 Analyse dynamique

Dans la partie précédente, nous avons présenté un couplage entre un modèle dynamique et un modèle statique. En réalité, ces deux modèles sont couplés via un algorithme d'intégration temporelle. Un premier couplage possible est donc celui d'un modèle dynamique avec son « solveur ». Ce couplage nécessite de spécifier les interactions possibles entre le/les modèles et le solveur.

Le couplage dépend donc de la nature des modèles simulés. Il peut rendre compte d'équations récursives (modèle intégré en temps discret, à pas fixe), d'équations différentielles ordinaires (ODE), ou d'équations différentielles algébriques (DAE). Nous formalisons ces interactions dans les thèse de Sana Gaaloul (temps discret, et ODE avec gestion des événements) et dans la thèse d'Abir Rezgui (DAE avec gestion des événements).

Le couplage dépend également du type de solveur utilisé. Pour ne parler que des solveurs d'ODE, ils peuvent mettre en oeuvre un ou plusieurs pas de calcul (Euler, Runge Kutta, ...) implicite ou explicite, variable ou fixe, avec un ordre d'intégration différents (rectangle, trapèze, Simpson). D'une manière générale ce couplage peut se représenter comme suit.

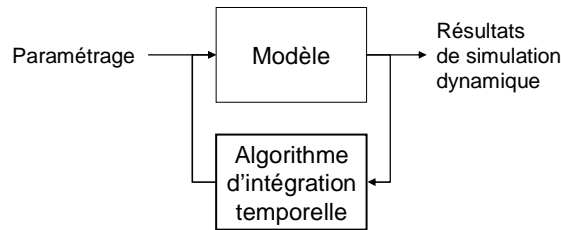


Figure 1-27 : Couplage d'un modèle et d'un solveur pour la simulation dynamique.

Il est même parfois possible de réaliser des simulations temporelles avec une discrétisation spatiale plutôt que temporelle à partir du moment où l'on maîtrise le déplacement (axe, positions initiales et finales). Plaçons nous donc dans une hypothèse quasi-statique pour modéliser un contacteur. La force étant fixée pour chaque position, l'intégration de l'équation de la dynamique est réalisable symboliquement. A partir de cette expression, une simulation dans le domaine spatial peut être faite, calculant le temps en fonction de la position, au lieu de la position en fonction du temps. Cette spécificité conduit à la possibilité de paralléliser les calculs pour chaque position comme nous l'avons montré sur la Figure 1-22, mais également d'exprimer de manière symbolique le calcul du temps de commutation, permettant en particulier son optimisation [30].

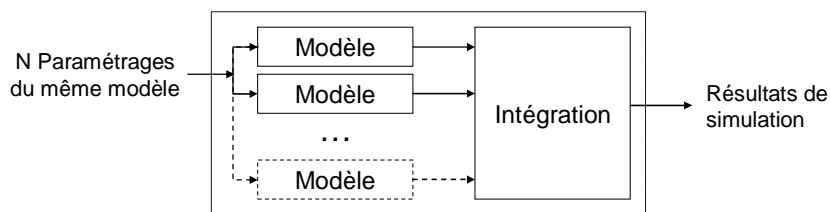


Figure 1-28 : Couplage séquentiel en N modèles parallèles et l'algorithme d'intégration spatiale.

### 1.2.1.3 Analyse de sensibilité

L'analyse de sensibilité est une phase de la conception qui arrive très rapidement dès qu'une première modélisation est disponible. Elle permet d'étudier la variation des grandeurs calculées en fonction de variations sur les entrées et paramètres du modèle.

Voici une méthodologie globale de l'analyse d'incertitudes [31]:

- Qualification et quantification des sources d'incertitudes (*liste des variables concernées, plage de variation, distribution de probabilité, dépendances entre variables...*)
- Propagation de l'incertitude au travers du modèle
- Analyse de sensibilité (*classement des sources d'incertitudes par rapport aux influences sur les sorties du modèle*)

Voici les méthodes de propagation d'incertitude que nous retrouvons classiquement [31], et que nous avons mises en œuvre dans différents travaux :

- L'approche Min-Max, permettant de calculer un encadrement de la sortie du modèle, deux méthodes peuvent être utilisées :
  - par un algorithme d'optimisation [43]
  - par arithmétique d'intervalle [33]
- L'approche statistique, permettant de calculer la valeur moyenne et la dispersion
  - par tirages aléatoires ou déterministes sur le modèle direct ou sur un modèle approché (*Monte Carlo*)
  - par approximation de Taylor (décomposition de la variance / méthode des perturbations) [29]

Il est possible de représenter ces couplages, qu'il s'agisse de méthodes min/max (optimisation, intervalles) ou d'analyse de la variance (Monte Carlo, approximation de Taylor)

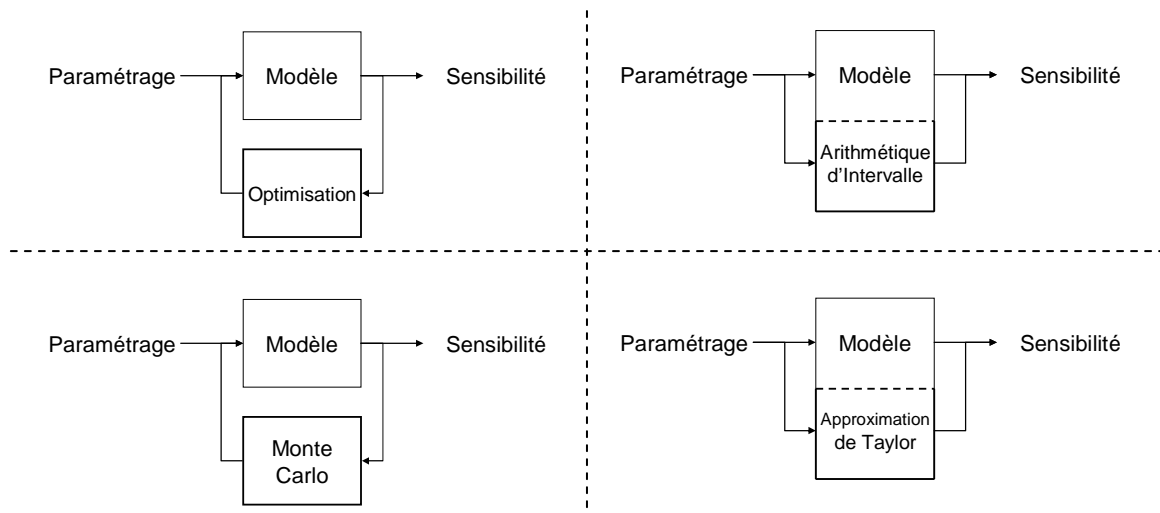


Figure 1-29 : Différents couplage pour l'analyse de sensibilité

En analysant les couplages de la Figure 1-29, on remarque que le calcul de sensibilité peut faire apparaître des couplages itératifs entre modèle et outil d'analyse (Optimisation et Monte Carlo). Dans les deux autres cas (arithmétique d'intervalle et approximation de Taylor) apparaissent des couplages entre le modèles de calcul et un second modèle apportant une information complémentaire (intervalles, développement de Taylor). On pourrait représenter sur cette figure d'autres méthodes qui viendrait conforter la nécessité de gérer ces 2 types de couplages.

Nous pouvons reprendre le dernier problème traité, celui de la simulation dynamique de du micro commutateur pour étudier l'influence de la variation des entrées sur le temps de commutation en particulier. Pour ce faire, nous avons mis en place la démarche d'approximation de Taylor à l'ordre 1, c'est-à-dire l'approximation linéaire. L'avantage de l'approximation linéaire, par rapport à une méthode de Monte Carlo, est qu'une distribution statistique telle qu'une loi normale (Gaussienne) peut être propagée instantanément grâce au Jacobien du modèle. Son inconvénient majeur est bien sûr la validité de l'approximation linéaire.

Nous voyons dans la Figure 1-30 que les variables les plus sensibles (en particulier le courant) devront faire l'objet d'une attention particulière durant la réalisation du dispositif afin de s'approcher au mieux des résultats de simulations.

Nous voyons également que pour diminuer le temps de réponse, et donc améliorer les performances du micro actionneur, il faut en premier lieu augmenter le courant dans les conducteurs (courant\_down), puis diminuer la longueur de l'aimant mobile (longm), et enfin diminuer la largeur des aimants fixes (largf). Les autres paramètres ne jouant un rôle que secondaire. Ces informations peuvent également être utilisées pour guider un algorithme d'optimisation comme nous allons le voir.



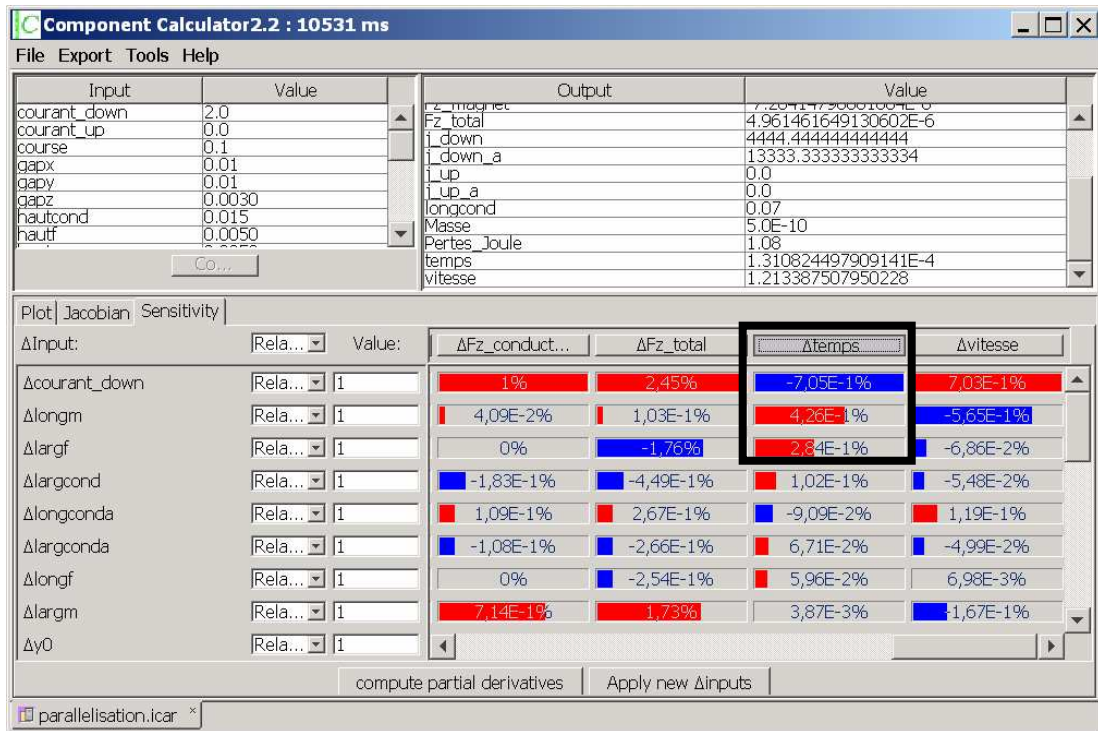


Figure 1-30 : Analyse de sensibilité utilisant le Jacobien

## 1.2.2 Optimisation

Dans cette partie, nous allons voir comment le couplage d'un modèle et d'un algorithme d'optimisation permet de réaliser du dimensionnement ou de l'identification.

### 1.2.2.1 Principe général de l'inversion de modèle

On définit de manière classique le problème d'analyse ou de simulation comme un problème direct. Il calcule les performances (*sorties : forces, vitesse, ...*) d'un système donné (*entrées : géométrie, propriétés physiques, ...*). Résoudre le problème inverse consiste à définir le système (*entrées : géométrie, propriétés physiques, ...*) pour atteindre des performances souhaitées (*sorties : forces, vitesse, ...*) dans le cas du dimensionnement. Dans le cas de l'identification, le problème inverse consiste à trouver les paramètres d'un modèle afin de minimiser la différence avec des mesures par exemple.

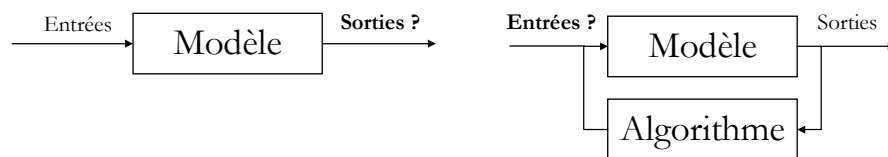


Figure 1-31 : Problème direct (simulation) et problème inverse (optimisation)

Pour ce faire, des algorithmes d'optimisation existent et acceptent certaines classes de modèles afin de réaliser le couplage. Par exemple, certains algorithmes nécessitent des modèles à variables purement discrètes ou purement continues, certains ne traitent que de modèles ou contraintes linéaires, d'autres exigent que le modèle fournisse le Jacobien des sorties par rapport aux entrées, d'autres prennent en considération des informations d'encadrement de la solution (*optimisation par intervalle*). Une typologie des algorithmes d'optimisation non exhaustive est esquissée dans la Figure 1-32 avec comme fil conducteur les problèmes d'optimisation continus, non linéaires,

- à convergence globale par approche meta-heuristique distribuée,
- à convergence locale exploitant l'information du gradient.

Avec bien sûr la possibilité d'hybrider ces algorithmes par des **couplages**.

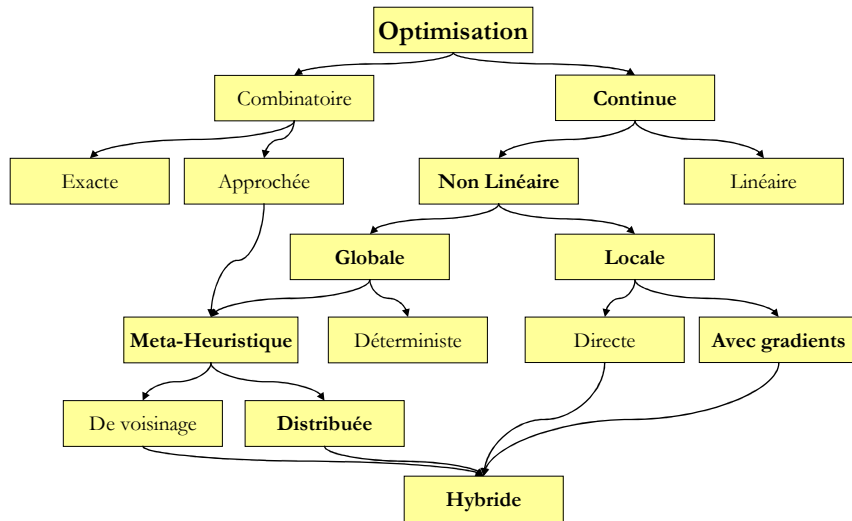


Figure 1-32 : Une typologie d'algorithmes d'optimisation [NEOS Guide<sup>3</sup>]

Outre le couplage du modèle à l'algorithme, il est également nécessaire de gérer la bonne adéquation du cahier des charges avec l'algorithme d'optimisation. En effet, certains algorithmes ne gèrent pas de contraintes, d'autres ne traitent pas les objectifs multiples, etc.

De plus, comme il n'existe certainement pas d'algorithme d'optimisation performants dans toutes les situations (« no free lunch theorem » [44]). Le radar ci-dessous [45] illustre les caractéristiques des principaux algorithmes utilisés en génie électrique. Le couplage entre l'algorithme et le modèle doit donc être dynamique pour en changer rapidement selon les besoins d'optimisation.

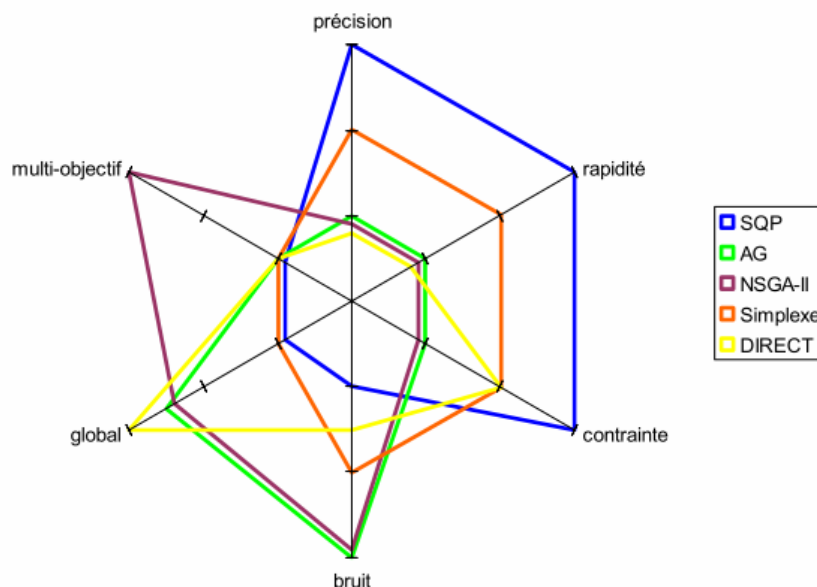


Figure 1-33 : Classification des méthodes d'optimisation suivant leurs caractéristiques (extrait de [45])

<sup>3</sup> [www.neos-guide.org](http://www.neos-guide.org)

### 1.2.2.2 Dimensionnement

Pour illustrer le « dimensionnement », reprenons le modèle précédent, disposant du Jacobien, afin de réaliser une optimisation sous contraintes. En effet, le fait de devoir gérer des contraintes sur des grandeurs continues requiert souvent l'utilisation d'algorithmes déterministes de type Quasi-Newton qui exploitent l'information du Jacobien.

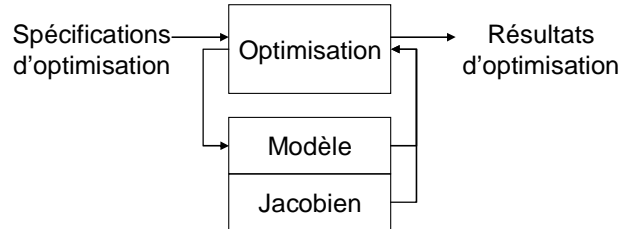


Figure 1-34 : Optimisation d'un modèle disposant du Jacobien

Le cahier des charges, ou spécification d'optimisation est le suivant :

Tableau 1-1 : spécifications d'optimisation

<i>Paramètre</i>	<i>Type de contraintes</i>	<i>Valeurs</i>
<i>Densité de courant</i>	<i>Inférieur à</i>	<i>5 kA/mm<sup>2</sup></i>
<i>Vitesse en fin de course</i>	<i>Inférieur à</i>	<i>1.5 m/s</i>
<i>Puissance d'alimentation</i>	<i>Inférieur à</i>	<i>1 W</i>
<i>Résistance aux chocs</i>	<i>Supérieur à</i>	<i>15 g</i>
<i>Temps de réponse</i>	<i>A minimiser</i>	

Le temps de commutation est réduit de 160 $\mu$ s à 118  $\mu$ s, la densité de courant atteint sa valeur maximale autorisée (5kA/mm<sup>2</sup>). La puissance atteint également sa valeur maximal autorisée (1W) et la résistance aux chocs est de 18.g ( $g=9.81$  m/s<sup>2</sup>) ce qui est supérieur à la valeur minimale souhaitée de 15g.

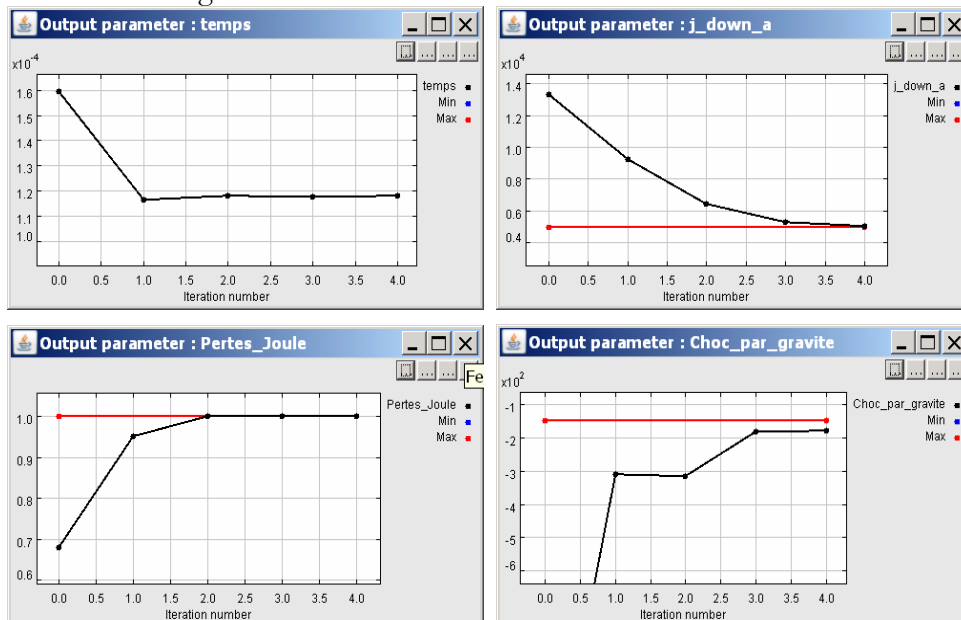


Figure 1-35 : Evolution de l'optimisation sous contrainte durant les 5 itérations

La géométrie correspondante dispose de plus gros conducteurs afin d'augmenter le courant (limité par la densité de courant et la puissance). Les aimants fixes sont plus petits, juste suffisants au maintien de l'aimant mobile en position haute ou basse sous des accélérations de 18g.

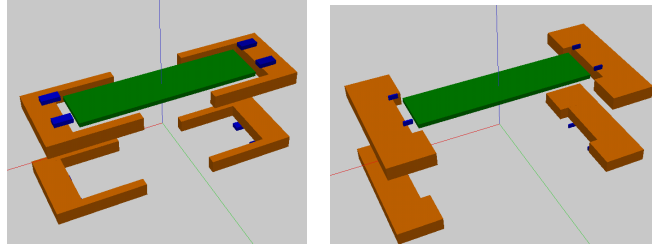


Figure 1-36 : géométrie du micro actionneur, avant et après optimisation

De nombreuses autres optimisations sont possibles et nécessiteront un couplage peut-être différent entre l'algorithme et le modèle du dispositif.

### 1.2.2.3 Identification

Il est très fréquent, pour construire un modèle, d'avoir à identifier des paramètres à partir de mesures ou de données constructeur. Cette procédure réalise le couplage entre un modèle, des données et un algorithme d'optimisation. Certaines procédures sont génériques et peuvent s'appliquer à tout type de modèle (« curve fitting » par moindres carrés). D'autres sont spécifiques à un type de modèle et l'algorithme d'optimisation peut donc être très spécifique.

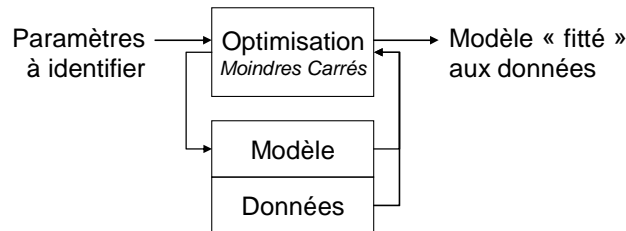


Figure 1-37 : Identification d'un modèle à partir de données

Pour illustrer ce propos, prenons un dispositif modélisé en fréquence et que nous souhaitons simuler dans le domaine temporel. Il est alors nécessaire de fournir un schéma équivalent à constantes localisées, lesquelles sont identifiées par optimisation.

Prenons comme application le cas du transformateur planar décrit au début de cette partie pour lequel un modèle en fréquence a été établi analytiquement. Prenons le cas d'une impédance de la Figure 1-9, l'impédance B définie analytiquement par l'expression suivante :

$$B = rdc \cdot \left( 1 - \frac{2(1-j)\sqrt{\frac{f}{f_p}}}{\sin\left(2(1-j)\sqrt{\frac{f}{f_p}}\right)} \right)$$

$$\frac{f}{f_p} = \left(\frac{a}{2\delta}\right)^2$$

$$f_p = \frac{4\rho}{a^2 \pi \mu}$$

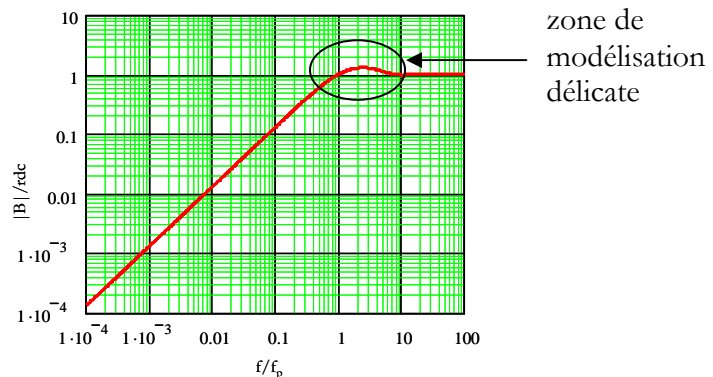


Figure 1-38 : Modèle fréquentiel de l'impédance « B » du transformateur planar

Les paramètres du modèle sont, « rdc » la résistance en continu, « fp » la fréquence de peau,  $\mu$  la perméabilité du matériau,  $\rho$  sa résistivité.

Nous avons construit le circuit équivalent à l'impédance B comportant 6 constantes à déterminer afin de modéliser au mieux les effets au voisinage de la fréquence de peau.

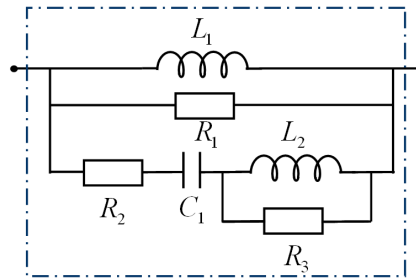


Figure 1-39 : Circuit équivalent à l'impédance « B »

L'identification se fait par la méthode des moindres carrés, c'est-à-dire par minimisation de la somme des différences quadratiques des deux modèles. L'algorithme de minimisation utilisé exploite la méthode du Simplex (Nelder–Mead) et recherche la valeur des paramètres dans un espace de recherche spécifié. La convergence de cette méthode basée sur une recherche locale directe, c'est-à-dire de proche en proche mais sans gradients, est très sensible au point de départ. D'une manière générale, si le modélisateur ne peut approximer les valeurs lui-même où par un modèle approché, il est souhaitable d'utiliser, en amont, un algorithme stochastique (algorithme génétique par exemple) afin d'obtenir un point de départ suffisamment cohérent.

Ainsi, dans la Figure 1-40, nous pouvons constater la convergence de l'algorithme de minimisation hybride (génétique + simplex) avec un nombre d'itération imposé de 12500 pour la première phase (recherche de valeurs initiales par algorithme génétique) et une centaine d'itérations pour la phase de minimisation précise (simplex).

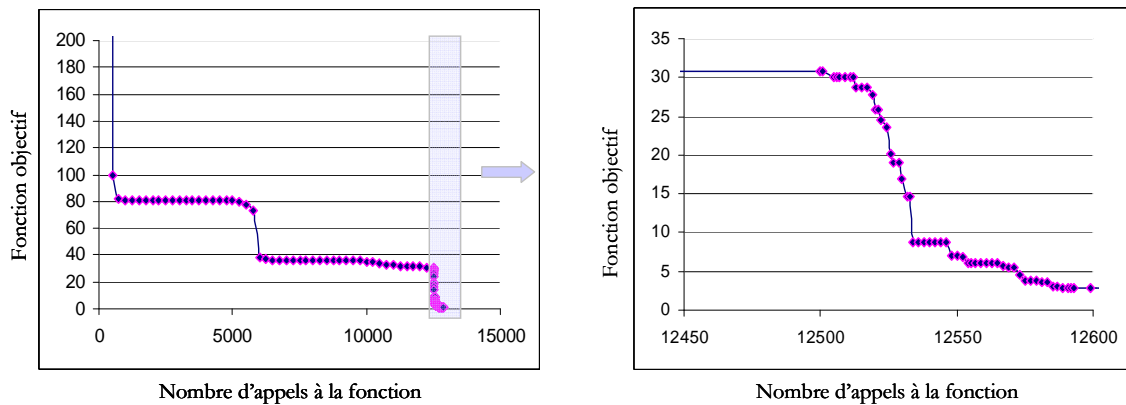


Figure 1-40 : Deux étapes d'optimisation successives, à gauche la première avec un algorithme génétique et à droite un zoom sur la fin du calcul où l'algorithme Simplex prend le relais pour une convergence plus fine

#### 1.2.2.4 Réduction de modèle

La réduction d'un modèle consiste à accélérer sa résolution en dégradant le moins possible la précision. La difficulté est donc bien souvent de trouver la limite entre gain de temps et perte de précision.

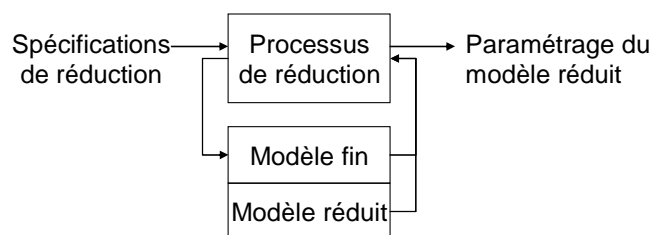


Figure 1-41 : Réduction d'un modèle trop complexe

Des techniques de surface de réponse, ou plans d'expériences numériques, permettent d'identifier un modèle réduit dans un but d'optimisation [36][37][38]. Les fonctions à identifier sont généralement imposées (fonctions à base radiales, fonctions de krigeage, réseau bayésien, ...), et les données servant à l'identification peuvent provenir de résultats de simulation. Dans le cadre de l'optimisation, une contrainte forte est de conserver la dépendance entre les sorties du modèle et les paramètres à dimensionner.

L'objectif de la réduction peut provenir également de la nécessité de coupler le modèle à d'autres modèles, pour la simulation au niveau du système. Dans ce cas, des traitements numériques peuvent être directement appliqués au modèle fin, ce qui a pour conséquence la perte de dépendance du modèle avec les paramètres physiques et géométriques. Par exemple, pour un système dynamique, la réduction consiste souvent à réduire l'ordre du système, c'est-à-dire le nombre de variables d'état. Cette démarche peut être automatisée par une analyse numérique en négligeant les constantes de temps les plus faibles.

Considérons par exemple la réduction pour la simulation système, et prenons comme illustration l'exemple du transformateur planar précédent. La modélisation analytique fréquentielle nous a permis d'identifier précisément chaque constantes localisées, de chaque impédances, de chaque plaques à empiler. Le résultat final est un modèle temporel précis mais très lourd (*environ 1500 constantes localisées au total*), qui sert essentiellement à analyser des grandeurs locales (*courants de boucle entre spires*). Une technique de réduction peut s'appuyer sur le principe d'identification d'un modèle plus rapide. Ici, nous avons identifié un modèle réduit du transformateur.

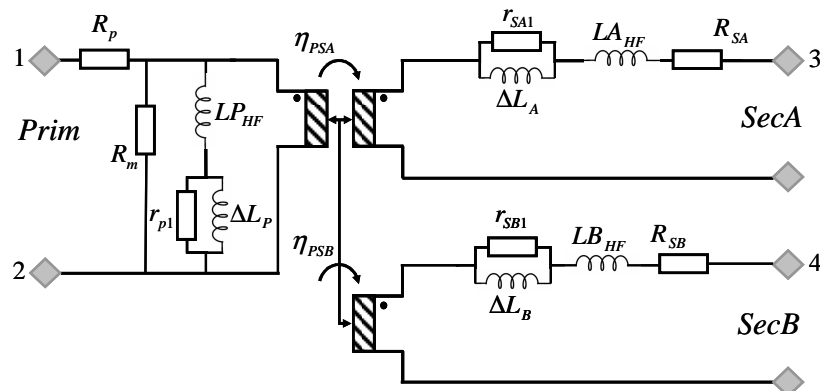


Figure 1-42 : circuit équivalent réduit du transformateur planar

Il est alors réaliste de faire une étude système. Pour comparer les 2 modèles, nous avons couplé le transformateur à un redresseur doubles alternances à 125 kHz, débitant sur un filtre LC coupant à 10 kHz

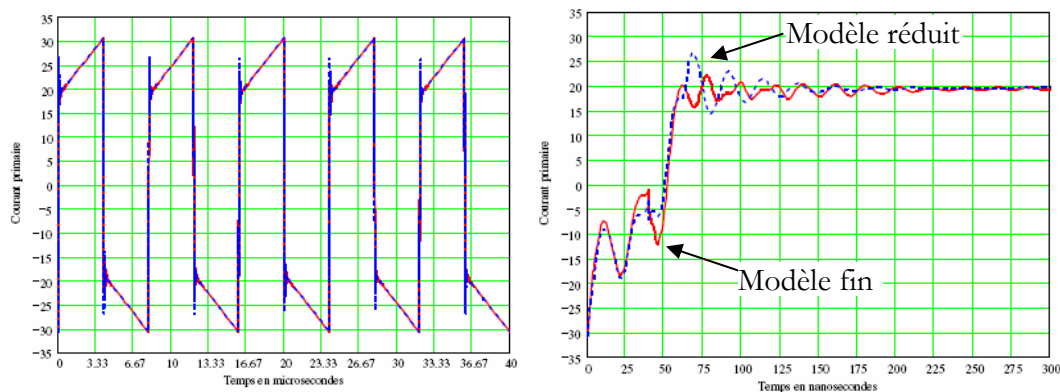


Figure 1-43 : Forme d'onde du courant au primaire du transformateur, à droite le zoom temporel sur les oscillations

### 1.2.2.5 Hybridation d'algorithme d'optimisation

Nous avons vu dans l'exemple d'identification d'impédance, qu'il était parfois utile d'hybrider des algorithmes à convergence globale (stochastique) et locale (déterministe) (comme nous l'avons vu sur la Figure 1-40).

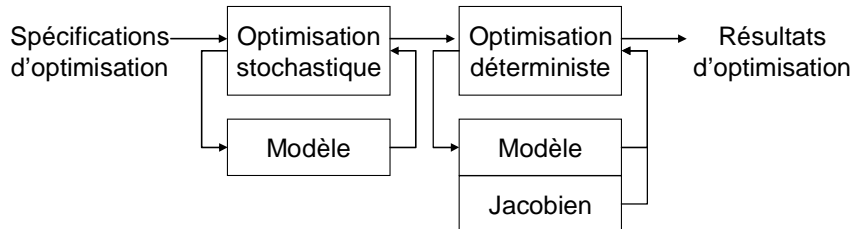


Figure 1-44 : Exemple d'un couplage séquentiel d'algorithme s'appuyant sur modèle offrant ou non le Jacobien

C'est également le cas lorsqu'on réalise des dimensionnements. L'exemple ci-dessous illustre l'optimisation séquentielle génétique-SQP du MEMS magnétique présenté dans la Figure 1-16.

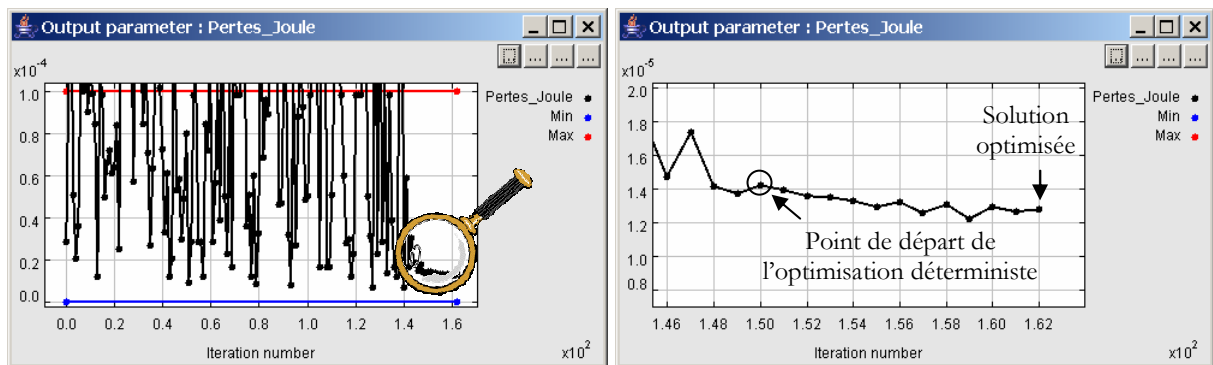


Figure 1-45 : Minimisation hybride Génétique-SQP des pertes Joules d'un verrou magnétique MEMS.

### 1.2.2.6 Optimisation multi-niveaux

Après l'application de plusieurs algorithmes à un modèle, il convient d'aborder l'optimisation multi-modèles et en particulier l'optimisation multi-niveaux de modélisation. L'idée principale vient du constat qu'un modèle fin est long à calculer et encore beaucoup plus long à optimiser. Un modèle réduit (*surrogate model*) est alors substitué au modèle fin pour réaliser un prédimensionnement. La solution est alors utilisée pour réduire l'espace de recherche d'optimisation du modèle fin. Dans [39] nous utilisons 2 niveaux de discrétisation du verrou magnétique MEMS décrit précédemment pour réaliser l'optimisation.

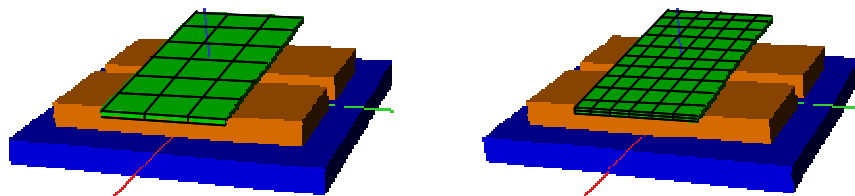


Figure 1-46 : Deux niveaux de discrétisation définissant le modèle rapide ( $6 \times 3 \times 1 = 18$  blocks) et le modèle fin ( $12 \times 6 \times 2 = 144$  blocks).

Une première stratégie simple consiste à optimiser le modèle grossier puis vérifier le résultat sur le modèle fin pour valider la solution. Nous avons donc appliqué un algorithme génétique (AG) (15 parents, 100 enfants, 75 générations conduisant à 7516 évaluations en 47 minutes). La solution obtenue vérifie les contraintes, mais cette même solution appliquée au modèle fin pour validation, n'est pas concluante vis-à-vis de ces contraintes.



Tableau 2: Optimisation avec stratégie évolutionnaire sur modèle rapide + calcul sur modèle fin

	Génétique sur modèle rapide	Calcul sur modèle fin
Pertes Joules (mW) à minimiser	18,1	18,1
Couple de maintien ( $\mu\text{N.m}$ ) ( $>0.1$ )	0,10015	<b>0,093</b>
Couple d'actionnement ( $\mu\text{N.m}$ ) ( $>0.025$ )	0,0254	0,0249
Nombre d'itérations	7516	1
Durée (sec)	2820	15

Une solution pour améliorer la rapidité notamment par une bonne gestion des contraintes, consiste à exploiter le gradient des modèles si celui-ci est disponible. La faiblesse d'un algorithme à gradient (SQP dans notre cas) venant du fait qu'il se fait piéger par des minima locaux, une stratégie « multi-start » a été employée pour produire un vecteur de solution de pré-dimensionnement à partir de plusieurs optimisations parallèles. Enfin, une optimisation SQP à partir de la meilleure solution sur le modèle fin permet de converger rapidement vers une solution satisfaisant aux contraintes. Une bonne solution est obtenue en moins de 8 minutes, soit 6 fois plus rapidement qu'avec l'algorithme génétique utilisé précédemment.

Tableau 3: Optimisation avec stratégie « multi-start » SQP sur modèle rapide + SQP sur modèle fin

	Le meilleur de 6 SQP sur modèle rapide	SQP sur modèle fin
Pertes Joules (mW) à minimiser	13,1	14,7
Couple de maintien ( $\mu\text{N.m}$ ) ( $>0.1$ )	0,1	0,1
Couple d'actionnement ( $\mu\text{N.m}$ ) ( $>0.025$ )	0,025	0,025
Nombre d'itérations	89	4
Durée (sec)	235	227

Ayant défini un couplage pour l'optimisation et un couplage pour l'identification de surface de réponse, il est possible de définir un couplage pour l'optimisation de surface de réponse obtenues dynamiquement.

Une stratégie peut être mise en œuvre quand le modèle fin ne peut être optimisé (gradient indisponible par exemple). L'idée est d'utiliser un modèle réduit par surface de réponse que l'on vient affiner à chaque nouvelle solution d'optimisation. A chaque itération, l'espace de recherche est réduit (Figure 1-47), centré sur la solution optimale du modèle réduit précédent, et ce jusqu'à convergence.

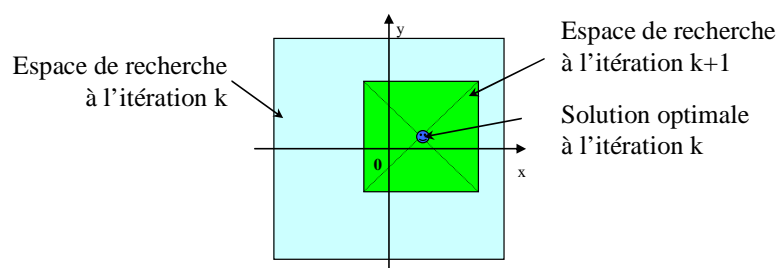


Figure 1-47 : Optimisation par surface de réponse successives

Cette stratégie a été mise en œuvre dans le logiciel GOT<sup>4</sup> réalisé par Jean-Louis COULOMB et appliquée à l'optimisation d'un NEMS magnéto-mécanique [40]

Une dernière catégorie d'optimisation multi-niveaux peut être présentée, il s'agit du « Space mapping ». L'idée est la même que la technique précédente, sauf qu'ici, le modèle réduit ne peut pas être modifié. Il s'agit alors de recalibrer les modèles, en jouant sur les entrées ou les

<sup>4</sup> GOT : Plans d'expériences numériques et optimisation <http://forge-mage.g2elab.grenoble-inp.fr/project/got>



objectifs à atteindre (output mapping) [46]. Une stratégie encore plus évoluée exploite les gradients pour réaliser également un alignement des plans tangents des deux modèles (Manifold mapping).

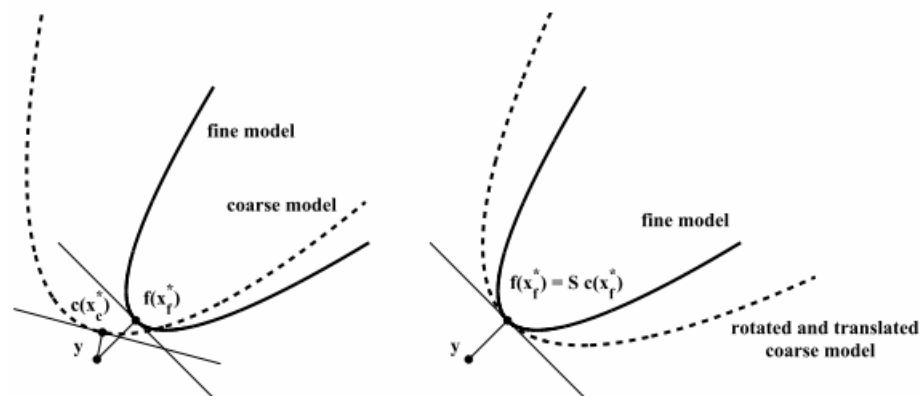


Figure 1-48 : Alignement des modèles par la technique « manifold mapping » [42]

Cette stratégie a toujours été exploitée avec des gradients approchés (Méthode de Broyden) mais nous avons montré [41] que l'utilisation de vrais gradients sur des problèmes réels permettait de mieux converger que les solutions classiques.

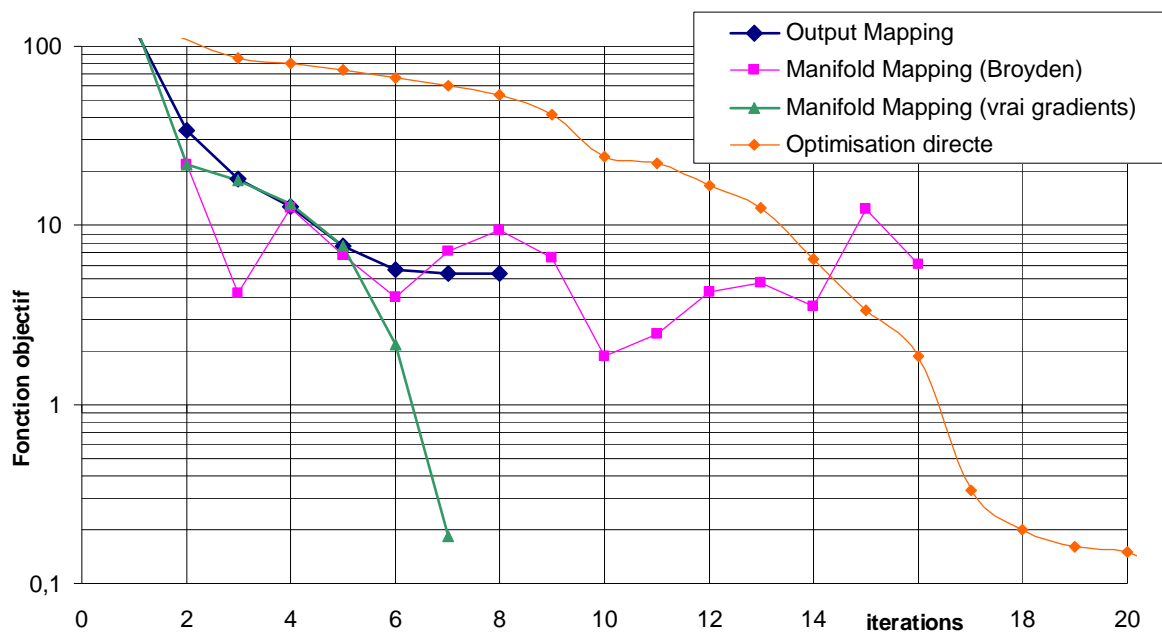


Figure 1-49 : Comparaison de convergence entre différentes technique de space mapping et une optimisation directe

Dans ces différents couplages, les difficultés viennent de la variété de stratégies d'optimisation disponibles et des cahiers des charges associés, ou encore de la difficulté d'automatiser des itérations entre les différents niveaux de modélisation tout en conservant une dépendance des paramètres (identification de modèle réduit...).

### 1.2.2.7 Robustesse et fiabilité

La robustesse et la fiabilité (Figure 1-50) sont deux notions liées aux incertitudes et à l'analyse de sensibilité évoquées plus haut. La robustesse caractérise la capacité d'une solution à être peu sensible aux variations des grandeurs soumises à incertitude. La fiabilité garantit qu'un système ne sortira pas de son domaine de validité quelques soient les variations des grandeurs soumises à incertitude.

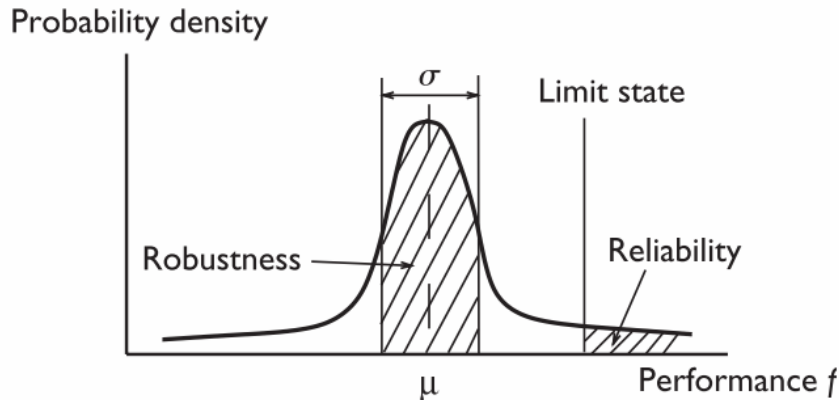


Figure 1-50 : Concepts de robustesse et de fiabilité [47]

Une optimisation robuste et fiable doit donc prendre en compte ces notions au cours de l'optimisation. Pour ce faire, différentes techniques que nous avons mises en œuvre sont possibles. Elles sont basées sur l'intégration d'une analyse de sensibilité au modèle pour ensuite exploiter les résultats par l'optimisation.

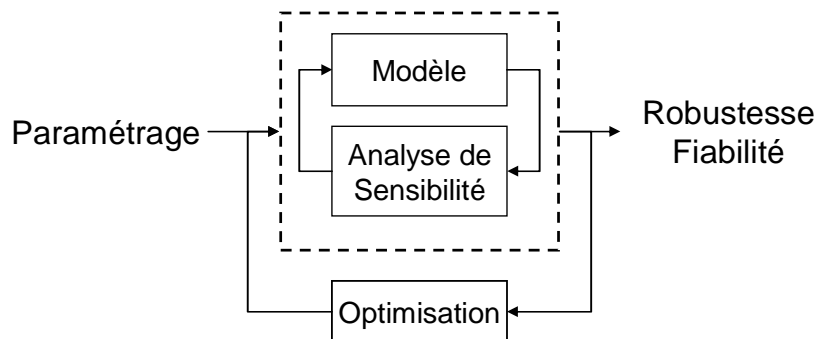


Figure 1-51 : Couplage récursif de l'optimisation, de l'analyse de sensibilité et du modèle

La technique d'analyse de sensibilité de Monte Carlo n'est pas utilisée car elle est trop coûteuse pour être intégrée dans une boucle d'optimisation.

Une première technique appelée « worst-case » [43], relativement coûteuse, consiste à intégrer au modèle un algorithme d'optimisation pour calculer les valeurs minimales et/ou maximales sujettes à optimisation. Il s'agit donc d'une optimisation d'optimisation.

Les techniques les plus performantes sont celles qui adjoignent au modèle un modèle complémentaire pour l'analyse de sensibilité et non une boucle itérative sur le modèle. Une première technique [33] s'appuie sur l'arithmétique d'intervalle et sa capacité à encadrer les grandeurs calculées par un modèle. Les valeurs minimales et maximales sont alors exploitées pour la fiabilité, et la taille de l'intervalle pour la robustesse. Aujourd'hui ces techniques ne sont pas encore bien adaptées à des modèles complexes en raison d'une sur estimation des intervalles qui

se propage et s'amplifie au travers du modèle. Cette technique qui reste d'actualité est également intéressante pour l'optimisation globale [33].

Une autre technique basée sur un développement de Taylor permet à moindre coût de fournir une information de sensibilité exploitable en optimisation. Si un développement de Taylor à l'ordre 1 est utilisé (Jacobien) et qu'une optimisation à base de gradient est exploitée, le modèle devra alors fournir son développement à l'ordre 2. Toutefois, des approximations permettent d'obtenir des résultats satisfaisants comme nous l'avons montré dans la thèse de Phuong PHAM-QUANG [34].

## ***Conclusions***

Nous avons vu dans cette partie de nombreux couplages entre les modèles qui peuvent être issus de différents formalismes, ainsi que des couplages entre ces modèles et des algorithmes d'analyse dont la variété peut être plus grande que ce qu'on imagine en général. Ces différents types de couplages issus de mon expérience, ne reflètent qu'une partie certainement très limitée de ce qui se fait au quotidien dans les laboratoires de recherche. Ils constituent pour ma part une partie importante de mes travaux, et à ce titre, je cherche à améliorer leur prise en compte dans les outils que nous développons. Ainsi, chaque nouveau type de couplage est pour moi l'occasion de travailler sur la sémantique de l'information échangée et la compatibilité des formalismes à coupler. Lorsque des types de couplage sont récurrents, il est alors nécessaire de les automatiser. Ce travail met en avant des enjeux scientifiques spécifiques que je vais maintenant développer.

## ***Bibliographie***

- [1] G.Dauphin-Tanguy « Les bond graphs et leur application en mécatronique », Techniques de l'Ingénieur, S 7222 -1999
- [2] X.Roboam,S.Astier « Graphes de liens causaux pour systèmes à énergie renouvelable », Techniques de l'Ingénieur, D 3 970
- [3] D. C. Hamill, “Lumped equivalent circuits of magnetic components: the gyrator-capacitor approach,” IEEE Trans. Power Electron., vol. 8, no. 3, pp. 97–103, Apr. 1993
- [4] Bertrand Du PELOUX de Saint Romain, « Modélisation des actionneurs électromagnétiques par réseaux de reluctances. Création d'un outil métier dédié au pre-dimensionnement par optimisation », Thèse de l'Université Joseph Fourier de Grenoble, soutenue le 9 octobre 2006.
- [5] Thai Phuong DO « Simulation dynamique des actionneurs et capteurs électromagnétiques par réseaux de réductances : modèles, méthodes et outils », Thèse de l'Institut Polytechnique de Grenoble, soutenue le 10 mars 2010.
- [6] S. Gaaloul, F. Verdière, B. Delinchant, F. Wurtz, “Interface Component Architecture for building simulation”, Conférence IBPSA world 2011 - Novembre 2011- Sydney
- [7] S. Gaaloul, B. Delinchant, F. Wurtz, S. Thiers, B. Peuportier “ Strong coupling of a building thermal model with a controlled electrical heater for an hybrid energy simulation ”, ELECTRIMACS 2011, 6-8th June 2011, Cergy-Pontoise, France
- [8] Tran Van T., Martins Araujo D., Coulomb J.-L., Delinchant B., Chadebec O., Vrijsen N.H., Jansen J.W., Lomonova E.A. “Hybridizing network reluctance and boundary integral methods: comparisons on an E-core actuator” , COMPUMAG’11, Sydney, Australia, July 2011
- [9] H. A. Dang, B. Delinchant, S. Gaaloul, F. Wurtz “Electrical performance optimization of an HVAC dual flow”, ELECTRIMACS 2011, 6-8th June 2011, Cergy-Pontoise, France
- [10] A. Rezgui, L. Gerbaud, B. Delinchant, R.Barrak, A.Ghazel “Unified modelling technique using vhdl-ams and software components”, ELECTRIMACS 2011, 6-8th June 2011, Cergy-Pontoise, France
- [11] Duret, D.; Gerbaud, L.; Wurtz, F.; Rezgui, A.; Delinchant, B.; Cogitore, B.; “Optimisation and simulation methodology for passive ADSL splitter design”, Symbolic and Numerical Methods, Modeling and Applications to Circuit Design, SM2ACD 2010, Gammarth, Tunisia, October 5-6 2010.
- [12] Abdelhadi BESRI, «Modélisation analytique et outils pour l’optimisation des transformateurs de puissance haute fréquence planars », thèse de l’Université de Grenoble, soutenue le 26 mai 2011.
- [13] Besri A., Margueron X., Keradec J.-P., Delinchant B. “Wide Frequency Range Lumped Element Equivalent Circuit for HF Planar Transformer”, IEEE PESC, Rhodes, Grèce 2008
- [14] Lalao Harijaona RAKOTOARISON « Méthode et outil de génération automatique de modèle pour l’optimisation fortement contrainte des microsystèmes magnétiques », thèse de l’INPG, soutenue le 29 novembre 2007
- [15] H. L. Rakotoarison, J. P. Yonnet, B. Delinchant “Using Coulombian approach for Modeling Scalar Potential and Magnetic Field of a Permanent Magnet with Radial Polarization”, IEEE Transactions on Magnetics., Vol. 43, Issue 4, april 2007, pp 1261-1264, ISSN: 0018-9464

- [16] G. Akoun, J. P. Yonnet, "3D analytical calculation of the forces exerted between two cuboidal magnets", IEEE Transactions on Magnetics Vol. Mag-20 No. 5, pp. 1962-1964, September 1984.
- [17] J. L. G. Janssen , J. J. H. Paulides , J. C. Compter and E. A. Lomonova "Three-dimensional analytical calculation of the torque between permanent magnets in magnetic bearings", IEEE Trans. Magn., vol. 46, no. 6, pp.1748 - 1751 , 2010.
- [18] Delinchant, B.; Wurtz, F.; Yonnet, J.-P.; Coulomb, J.-L. "Interaction Between Ring-Shaped Permanent Magnets With Symbolic Gradients: Application to Magnetic Bearing System Optimization", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 47, No. 5, May 2011
- [19] H. Allag, J.-P. Yonnet, B. Delinchant, « Analytical Calculation of the Interactions between two Cylinder-shaped Magnets », COMPUMAG 2009, pages 574-575, 22-26 Novembre 2009, Florianópolis, BRESIL
- [20] H. Rostaing, J. Stepanek, B. Delinchant, J. Delamare, O. Cugat « Conception, modélisation et prototype d'un micro-relais bistable magnétique » revue internationale de génie électrique (RIGE). 2005, vol 8 n\_5-6, pp. 703-724
- [21] O. Chadebec, J. L. Coulomb and F. Janet, "A Review of Magnetostatic Moment Method", IEEE Transactions on Magnetics, Vol: 42, No: 4, April 2006, pp.515-520.
- [22] C. Rubeck, O. Chadebec, B. Delinchant, J-P. Yonnet and J-L Coulomb "J-Cuda vectorized and parallelized computation strategy for solving integral equations in electromagnetism on a standard personal computer", COMPUMAG'11, Sydney, Australia, July 2011
- [23] Chetouani, H. Haguet, V. Jeandey, C. Pigot, C. Walther, A. Dempsey, N. M. Chatelain, F. Delinchant, B. Reyne, G. "Diamagnetic Levitation of Beads and Cells Above Permanent Magnets", Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conference, TRANSDUCERS 2007. pp: 715-718, Lyon, France, 10-14 June 2007, ISBN: 1-4244-0842-3
- [24] H. Chetouani, L.H. Rakotoarison, B. Delinchant, G. Gruosso, A.Canova, M. Repetto "Graphite Levitation over four Magnets: Benchmarking Micrometer Dia-Magnetic Modeling", COMPUMAG 2007, 16th International Conference on the Computation of Electromagnetic Fields, June 24-28, 2007, Aachen, Germany
- [25] P. Kauffmann, V. Haguet, G. Reyne, B. Delinchant, « Efficient multipoles modeling for linear magnetized beads manipulations », CEFC 2010, Chicago, USA, 9-12 May 2010
- [26] Hichem Chetouani « Microsystemes et micromanipulation à lévitation diamagnétique : conception, réalisation et application à la micro fluidique digitale et à la biologie », Thèse de l'INPG, soutenue le 28/11/2007.
- [27] Quang, P.P., Delinchant, B., Coulomb, J.L.; du Peloux, B « Semi-analytical Magnetic-Structural coupling with contact analysis for MEMS/NEMS », CEFC 2010, Chicago, USA, 9-12 May 2010
- [28] N. Galopin, P. Pham Quang, B. Delinchant and J.L. Coulomb "Finite Element Modeling of deformable NEMS taking into account mechanical contact", COMPUMAG'11, Sydney, Australia, July 2011
- [29] Phuong PHAM QUANG, « Modélisation magnéto-mécanique d'un nano commutateur. Optimisation sous contraintes de fiabilité par dérivation automatique des programmes en Java », Thèse de l'université de Grenoble, soutenue le 11/10/2011.
- [30] Delinchant B., Gerbaud L., Wurtz F., «Parallelisation of quasi-static simulations of moving system: Application to the optimization of magnetic micro switch», NUMELEC 2008, Liège Belgique, Pages 84-85, 08-11 dec2008

- [31] Saltelli, A., K. Chan, and M. Scott (Eds.) (2000). *Sensitivity Analysis*. Wiley Series in Probability and Statistics. New York: John Wiley and Sons.
- [32] Duret, D.; Gerbaud, L.; Wurtz, F.; Rezgui, A.; Delinchant, B.; Cogitore, B.; “Optimisation and simulation methodology for passive ADSL splitter design”, *Symbolic and Numerical Methods, Modeling and Applications to Circuit Design, SM2ACD 2010*, Gammarth, Tunisia, October 5-6 2010
- [33] B. Delinchant “Interval Arithmetic for the Design of Electrical Engineering Systems”, *OIPE 2006 –September 13th – 15th 2006, Sorrento (Italy)*
- [34] Phuong PHAM-QUANG, « Modélisation magnéto-mécanique d’un nano commutateur. Optimisation sous contraintes de fiabilité par dérivation automatique des programmes en Java », thèse de l’Université de Grenoble, soutenue le 11/10/2011
- [35] Wolpert, D.H., Macready, W.G. (1997), "No Free Lunch Theorems for Optimization," *IEEE Transactions on Evolutionary Computation* 1, 67
- [36] Caldora Costa, M.; Coulomb, J.-L.; Marechal, Y.; Nabeta, S.I.; “An adaptive method applied to the diffuse element approximation in optimization process”, *IEEE Transactions on Magnetics*, , Issue Date: Sep 2001, Volume: 37 Issue:5, On page(s): 3418 - 3422
- [37] Lebensztajn, L.; Marretto, C.A.R.; Costa, M.C.; Coulomb, J.-L. “Kriging: a useful tool for electromagnetic device optimization”, *IEEE Transactions on Magnetics*, Issue Date: March 2004, Volume: 40 Issue:2, On page(s): 1196 - 1199
- [38] A. Abakar, J.-L. Coulomb, Y. Maréchal, "Radial Basis Function Network for Acceleration of Genetic Algorithm Optimization Procedures", *Proceedings of 9th IGTE, Symposium on Numerical Field Calculation in Electrical Engineering*, Graz, Austria, 1998.
- [39] B. Delinchant, H.L. Rakotoarison, V. Ardon, O. Chadebec and O. Cugat, “Gradient based optimization of semi-numerical models with symbolic sensitivity: Application to a simple ferromagnetic MEMS switch device”, *IJAEM*, Volume 30, Number 3-4, pp.189-200, 2009
- [40] P. Pham-Quang, B. Delinchant , J.L. Coulomb and B. Du Peloux “Optimization methodology of a magnetic deformable nano switch based on semi-analytical model”, *OIPE 2010, Sofia, Bulgaria, September 14 – 18 2010*
- [41] B.Delinchant, D.Lahaye, F.Wurtz, J.-L. Coulomb “Manifold mapping optimization with or without true gradients”, *ELECTRIMACS 2011, 6-8th June 2011, Cergy-Pontoise, France*
- [42] D. Echeverría, "Two new variants of the manifold-mapping technique", *COMPEL Vol. 26 Iss: 2, pp.334 – 344. 2007*
- [43] Magot D, Wurtz F, Cogitore B, Delinchant B, Keradec J-P “Methodology and Tools for Worst-Case Tolerance Design”. *Compumag 2003, July 13th-18th, New York, USA (2003)*.
- [44] Wolpert, D.H., Macready, W.G. (1997), "No Free Lunch Theorems for Optimization," *IEEE Transactions on Evolutionary Computation* 1, 67.
- [45] Stéphane BRISSET “Démarches et Outils pour la Conception Optimale des Machines Electriques”, *HDR de l’Université des Sciences et Technologies de Lille, 18/12/2007*
- [46] Delinchant B., Gruosso G., Wurtz F. “Two Levels Modeling for the Optimization of Electromagnetic Actuators”, *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 45, issue 3, March 2009, pp. 1724-1727, ISSN: 0018-9464
- [47] Y. Tsompanakis, N. D. Lagaros, M. Papadrakakis, “Structural design optimization considering uncertainties”, *Structures and Infrastructures collection, Taylor & Francis Ltd edition, 656 pages, 2007*

---

<b>2</b>	<b>Enjeux scientifiques de la CAO en ingénierie électrique .....</b>	<b>41</b>
2.1	Utilisation conjointe de méthodes/outils complémentaires .....	41
2.2	Sur la nature des modèles.....	41
2.2.1	Du modèle du produit aux modèles de conception.....	41
2.2.2	Compromis précision / temps de calcul.....	41
2.2.3	Modélisation analytique / numérique .....	42
2.2.4	Capitalisation / Réutilisation de connaissances .....	43
2.3	Sur la nature de la conception .....	43
2.3.1	Le système « conception ».....	43
2.3.2	Complexité du système « conception » .....	44
2.3.3	Dynamique du système « conception ».....	44
2.4	Les enjeux des environnements de CAO .....	44
2.4.1	Les complémentarités nécessitent les couplages .....	44
2.4.2	Couplages faibles / forts .....	45
2.4.3	Approche générative – Approche guidée par les modèles (MDA) .....	46
2.4.4	Des compétences informatiques nécessaires .....	47
2.5	Les paradigmes successifs d’objets, de composants et de services .....	47
2.5.1	3 niveaux hiérarchiques .....	47
2.5.2	Des objets aux composants .....	47
2.5.3	Des architectures orientées services aux composants orientés services.....	49
2.6	Vers le « cloud computing ».....	51
2.6.1	Rappel historique .....	51
2.6.2	Internet .....	51
2.6.3	Dématerialisation .....	51
2.6.4	Conception distribuée mais collaborative.....	51

## 2 Enjeux scientifiques de la CAO en ingénierie électrique

Cette partie vise à présenter les enjeux scientifiques que j'adresse afin de répondre aux problématiques de couplage mises en évidence dans la partie précédente.

### 2.1 *Utilisation conjointe de méthodes/outils complémentaires*

Parmi la large palette des outils de CAO, deux catégories ressortent largement du lot :

- la modélisation / simulation, permettant d'analyser virtuellement le produit seul ou dans un environnement,
- l'automatisation des parties d'analyse (réduction de modèle, analyse de sensibilité, optimisation, robustesse, ...)

La deuxième catégorie s'appuie sur la première de manière séquentielle et potentiellement itérative. Par ailleurs, des outils d'une même catégorie peuvent être utilisés conjointement pour définir un modèle composé ou un processus de conception plus ou moins automatisé.

L'existence d'un grand nombre d'outils, présents et utilisés en conception, conduit au besoin d'environnements permettant de les gérer ensemble. Cette nécessité, de mettre en œuvre un panel d'outils durant la conception, est liée aux connaissances mises en jeux, celles associées au produit à concevoir, et celles associées à l'action du concepteur.

### 2.2 *Sur la nature des modèles*

#### 2.2.1 *Du modèle du produit aux modèles de conception*

Aujourd'hui, les outils de CAO reposent de moins en moins sur un modèle du produit formalisé et exhaustif. Il ne s'agit plus uniquement d'un modèle comportemental destiné à simuler l'objet tel qu'il sera après fabrication (induction magnétique, trajectoires de flux, efforts exercés, températures...), mais bien d'un ou plusieurs modèles permettant de considérer le produit pour différents objectifs, dans différents contextes. En particulier, les nouveaux outils de CAO ne visent plus à définir un modèle unique (sensé refléter le produit dans tout contexte), ni à être complet et précis à la fois (deux directions antinomiques), et ne négligent plus son environnement, sa durée de vie, ses contraintes de fabrication, son recyclage, ni bien sûr sa rentabilité économique.

Par contre, une limite des outils de CAO est qu'ils ne peuvent pas intégrer tous les besoins de modélisation nécessaires à la conception de dispositifs de plus en plus complexes, devant satisfaire à de plus en plus de contraintes. Cette limite justifie le besoin d'environnements créant une synergie entre les capacités complémentaires d'outils existants.

Nous venons de voir que le(s) modèle(s) est au centre de la CAO, et les couplages, nécessaires à une conception globale.

#### 2.2.2 *Compromis précision / temps de calcul*

Nous avons coutume dans mon équipe de recherche de positionner nos méthodes de modélisation sur une courbe de compromis précision/temps de calcul. En effet, de manière générale, plus un modèle est précis plus il mettra de temps à se calculer. Un objectif lorsque nous travaillons sur des méthodes de modélisation et de translater cette courbe de compromis pour gagner en précision sans dégrader le temps de calcul ou inversement, d'améliorer la rapidité du modèle sans nuire à sa précision.



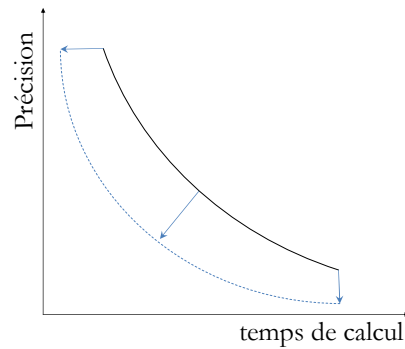


Figure 2-1 : Compromis précision / temps de calcul.

### 2.2.3 Modélisation analytique / numérique

La nature de la formulation utilisée pour décrire des modèles rapides est souvent analytique, quand à celle permettant de décrire des modèles précis elle est souvent numérique. Ainsi, il est possible de quantifier le temps de mise en œuvre des modèles sur cette courbe de compromis. En effet, une modélisation analytique est généralement coûteuse en ressources (homme.temps) car elle nécessite une analyse des phénomènes conduisant à la formulation d'hypothèses simplificatrices généralement spécifiques à chaque modélisation. De l'autre côté, une modélisation numérique est relativement rapide à mettre en œuvre car les logiciels de simulation implémentent des méthodes de modélisation suffisamment génériques pour adresser toute une classe de problèmes (e.g. magnétostatique par éléments finis, ...).

Un axe d'amélioration consiste donc à accélérer la mise en œuvre des modélisations analytiques. Une première solution peut être d'aider (automatiser) une partie des phases de modélisation analytique [1], en particulier en définissant des méthodologies et formalismes adaptés à la réutilisation de connaissances tels que Modelica<sup>1</sup>, VHDL-AMS<sup>2</sup> que nous explorons dans les thèse Abir REZGUI et de Sana GAALOUL ou la réutilisation directe de modèles existants via les composants logiciels que nous détaillons plus bas.

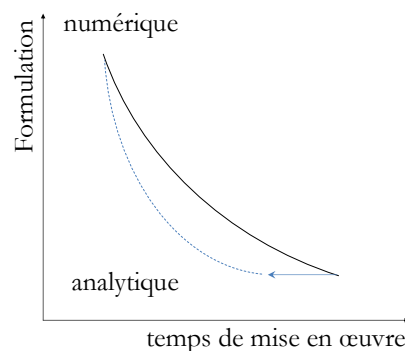


Figure 2-2 : Compromis formulation / temps de mise en oeuvre.

<sup>1</sup> MODELICA : [www.modelica.org](http://www.modelica.org)

<sup>2</sup> VHDL-AMS : standard IEEE 1076, définit le langage de description de matériel numérique / analogique

J'ai souvent pu constater que la frontière entre modélisation analytique et numérique n'est pas aussi hermétique que les partisans de l'une ou de l'autre approche aiment à le dire. Un autre axe consiste donc à exploiter et favoriser l'hybridation analytique/numérique par des modèles :

- semi-analytiques : modèle analytique exploitant des algorithmes d'intégration, de résolution de systèmes numériques.
- semi-numériques : modèle numérique contenant des parties analytiques pour lever des divergences, pour accélérer les calculs quand des solutions exactes sont disponibles.

#### 2.2.4 *Capitalisation / Réutilisation de connaissances*

L'accélération de la mise en œuvre des modélisations analytiques passe aussi par la possibilité de réutiliser des connaissances antérieures, qu'elles nous soient propres ou sous la forme de modèles et d'expertises externes. Mais la définition de modèles concrètement réutilisables est une gageure. J'ai participé et publié dans le domaine de l'ingénierie collaborative depuis mes débuts en recherche [2][3][4][5][6], j'ai maintenu mon intérêt en participant à des projets au sein du cluster GOSPI (Gestion et Organisation des Systèmes de Production et de l'Innovation), tels que le projet ASPIC (Analyse et Structuration des Pratiques en Ingénierie Collaborative) et SIM-SyPROD (Service, Interopérabilité, Modélisation pour les Systèmes de Production). Ces projets collaboratifs ont, entre autre, permis l'émergence du projet Dimocode<sup>3</sup> [7] pour lequel j'ai participé à spécifier la plateforme web ([www.dimocode.org](http://www.dimocode.org)) de capitalisation et réutilisation de modèles dont les tenants et aboutissants sont détaillés dans la HDR de Frédéric WURTZ [8]. Le GdR SEEDS anime aujourd'hui des communautés autour de cette plateforme, dans lesquelles je suis partie prenante (communautés Machines tournantes et actionneurs, Optimisation, et Bâtiment). Cette solution de capitalisation proposée par Dimocode, mettant en relation les modélisateurs autour de modèles dont la formalisation est laissée libre, est unique en son genre. Elle fait le pari d'échanges basés sur un savoir faire (les experts) plutôt que ne reposant que sur un savoir formalisé (les modèles). Toutefois, la formalisation est indispensable à l'automatisation de traitements par des machines, ce dont la conception collaborative devra s'outiller. Il faut donc aller plus loin et parvenir à allier dans des outils les savoirs faire informels et savoirs formels.

### 2.3 *Sur la nature de la conception*

#### 2.3.1 *Le système « conception »*

Le système « conception » est un ensemble organisé d'un ou plusieurs concepteurs, d'objets matériels ou immatériels à concevoir, et d'outils d'aide à la conception. La systémique (ce qui est propre au système) est une démarche méthodologique visant à étudier un système dans sa totalité, plutôt que par une décomposition, en argumentant que les interactions sont complexes et dynamiques.

Les définitions qui ont été données d'un système, font ressortir des notions liées aux couplages dynamiques. Un système est un ensemble d'unités en interrelations mutuelles (Von Bertalanffy, 1956 [9]), en interaction dynamique, qui sont organisés en fonction d'un but (J. de Rosnay, 1975 [10]). Un système est un tout, plus que la somme de ses parties, et prend forme en même temps que ses éléments se transforment (E. Morin, 1977 [11]). Cette place donnée à la dynamique des systèmes est souvent supplantée par sa nature complexe.

---

<sup>3</sup> DIMOCODE : [www.dimocode.org](http://www.dimocode.org)

### 2.3.2 *Complexité du système « conception »*

Complexe vient du latin *complexus* formé du préfixe *con-* (« avec ») et de *plexus* (« entrelacement ») et peut signifier « couplé ». Un système peut être généralement simplifié pour étudier ses parties de manière indépendantes, constituant l'approche cartésienne classique dite « réductionniste ». Un système complexe sera, quant à lui, modélisé pour construire ses couplages internes et avec son environnement, dans une approche dites « constructiviste » (Le Moigne, 1990 [12]).

Nous pouvons considéré la complexité en conception sous deux aspects, celui du produit et celui du processus. Elle s'exprime dans la difficulté de concevoir indépendamment les parties du produit, mais aussi dans la difficulté de définir les tâches cognitives qui guident le processus de conception.

### 2.3.3 *Dynamique du système « conception »*

La dynamique en conception apparaît tout d'abord par le fait qu'un processus de conception n'est pas prédéfini, en effet, chaque étape influe sur la nature et le déroulement des suivantes.

Ensuite, le processus de conception est contextuel par ses objectifs et les acteurs qui y participent. « Les nombreux propos des concepteurs évoquant la CAO révèlent que ces derniers sont demandeurs d'une souplesse d'utilisation, d'une prise en compte du contexte et de leurs savoirs » [LAV 00]

Enfin, le processus de conception est itératif, c'est-à-dire que chaque étape remet en cause des hypothèses et des choix faits dans des étapes précédentes. B. Chandrasekaran [13], acteur majeur de l'approche systémique, définit le processus de conception de manière classique, comme étant l'exploration d'espaces de solutions, la simulation et la vérification des solutions de conception, mais en stipulant la possibilité de re-conception et de répétition de ce cycle. En effet, des phases amonts abstraites (telles que l'analyse fonctionnelle) sont séparées des phases aval plus concrètes (comme le choix d'éléments réalisant une fonction particulière). Or, des études d'ergonomie cognitive [14] ont montrés que le concepteur entremêle nécessairement ces phases, passant par des représentations concrètes du produit, afin de mieux en cerner les contraintes.

Certes, quelques processus sont récurrents et souvent utilisés, c'est ainsi qu'une capitalisation de processus doit pouvoir être utilisée de manière complémentaire à la définition de nouveaux processus de conception ou à leur adaptation, ce qui constitue un véritable challenge pour le supporter de manière informatisée, c'est-à-dire formalisée.

## 2.4 *Les enjeux des environnements de CAO*

### 2.4.1 *Les complémentarités nécessitent les couplages*

Un environnement de CAO doit donc offrir un support à l'interopérabilité des outils de conception et permettre l'intervention du concepteur pour définir dynamiquement leur synergie. Deux axes synergiques existent, l'axe vertical associé au déroulement du processus de conception (e.g. l'analyse) et l'axe horizontal associé à une étape particulière du processus (e.g. modélisation) :

- **complémentarité horizontale** : gérer la complexité des dispositifs à concevoir par leur modélisation multi-outil (couplages multiphysiques, modélisations mixtes analytique/numérique...).
- **complémentarité verticale** : supporter et mettre en œuvre de nouveaux processus de conception multi-outils, plus performants, et robustes (validation d'hypothèses, dimensionnement multi-niveaux...)

Le couplage est ainsi à la base de la gestion de la complexité, mais n'oublions pas que cette complexité est associée à la contrainte de la dynamique de conception à laquelle il faut également répondre. En effet, il est parfois techniquement compliqué de mettre en œuvre un couplage de logiciels, comme mentionné dans [15], « l'effort de reprogrammation est clairement non trivial, embarrassant, et inhibe toute exploration rapide d'une conception nouvelle et innovante ».

Afin d'offrir des supports efficaces à cette complexité et cette dynamique, mes travaux s'inscrivent dans le but de proposer au concepteur un environnement logiciel considérant les systèmes par les divers couplages dont ils sont tissés et offrant des solutions pour les gérer dynamiquement.

#### 2.4.2 Couplages faibles / forts

Pour définir les couplages, le système étudié (produit à concevoir, processus de conception, ...) doit être clairement identifié car il peut devenir lui-même, par la suite, le composant d'un système plus global. La notion de granularité apparaît ensuite pour indiquer à quels niveaux se définissent les éléments d'un système et leurs couplages.

En informatique, le couplage est défini comme une métrique indiquant le niveau d'interaction entre deux ou plusieurs composants logiciels [16] (fonctions, modules, objets ou applications). Deux composants sont dits couplés s'ils échangent de l'information. On parle de *couplage fort* ou couplage serré si les composants échangent beaucoup d'information. On parle de *couplage faible*, couplage léger ou couplage lâche si les composants échangent peu d'information. Dans le développement de logiciel, les couplages forts sont à proscrire car ils conduisent à ne plus pouvoir déterminer « le qui, le quoi et le comment » d'une modification de données, ils rendent le composant peu souple, peu ouvert, et conduit à une réutilisation laborieuse. Au contraire, le couplage faible vise à établir un protocole d'échange et réduit au minimum les hypothèses et contraintes entre les composants.

Sur un système complexe, le couplage faible constitue donc une approche basique de la composition qui nécessite certainement une gestion complémentaire intégrée dans chaque composant pour parvenir à reconstruire les interactions plus justement. Le couplage fort quant à lui permet de définir des interactions riches entre les éléments du système mais la définition et la mise en œuvre de ces couplages est délicate. Aujourd'hui, les couplages forts sont souvent mis en œuvre à des niveaux de granularité faible (au sein d'un 'composant') car ces composants sont souvent réutilisés dans leur totalité et l'investissement peut donc être rentabilisé. Les couplages faibles, quant à eux, permettant une souplesse plus grande en raison de leur facilité de mise en œuvre, interviennent donc à un niveau de granularité plus élevé (au niveau du 'système') où les assemblages désassemblages sont plus fréquents.

Un axe d'amélioration, que nous investiguons est de construire plus facilement des couplages forts, plus dynamiques, afin de faire:

- bénéficier aux niveaux de faible granularité, un gain de souplesse dans les couplages,
- bénéficier aux niveaux de forte granularité, une modélisation plus fine des couplages.

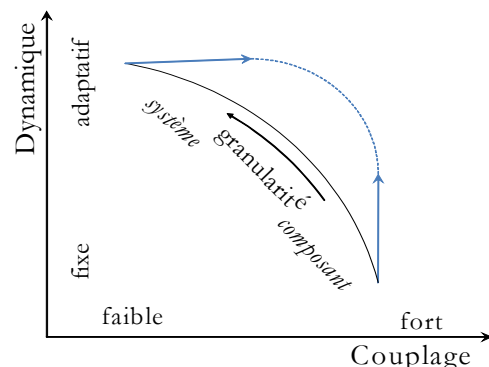


Figure 2-3 : Compromis dynamique / couplage

### 2.4.3 Approche générative – Approche guidée par les modèles (MDA)

La CAO vise à exploiter les capacités de calcul des ordinateurs pour parvenir aux objectifs de simulation. La modélisation consiste donc à définir le code informatique qui rendra possible la simulation. Un lien très fort existe donc entre modélisation et programmation, même si les outils de CAO se doivent de le masquer.

Dans le domaine du génie logiciel, la notion d'application dynamique [17] vise à rendre transformable des logiciels en cours d'exécution. Une analogie peut être faite avec nos modèles qui ont également un cycle de vie (développement, réutilisation, exécution). Aujourd'hui nous sommes capable de transformer nos modèles au stade du développement, de les configurer au stade de la réutilisation, mais ils sont « câblés en dur » lors de l'exécution. Un axe d'amélioration consiste donc à augmenter la flexibilité au niveau de la réutilisation et de l'exécution.

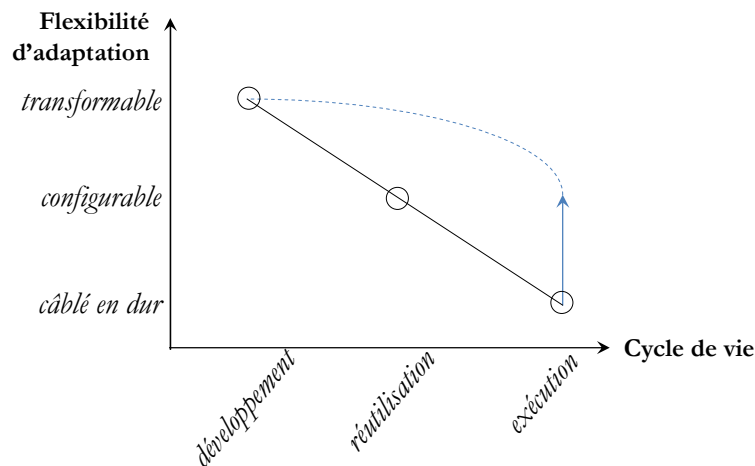


Figure 2-4 : Amélioration de la flexibilité d'un modèle en fonction de la phase du cycle de vie

Une manière de parvenir à cette flexibilité, basée sur une méthodologie de génération automatique de modèle, est d'accélérer les phases de développement et de réutilisation pour réaliser de manière quasi-transparente une adaptation des modèles en cours d'utilisation. La génération automatique des modèles exploitant les mêmes principes que l'approche générative d'application [18], est basée sur une description haut niveau, fonctionnelle, de ce que doit réaliser le modèle (approche MDA - Model Driven Architecture). Celui-ci est alors généré automatiquement à partir de codes/algorithmes disponibles dans une bibliothèque selon le même principe que celui décrit en Figure 2-5.

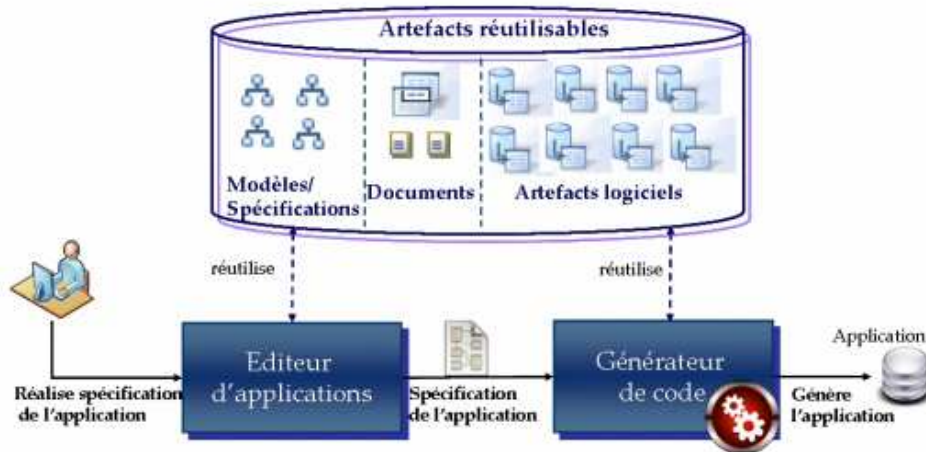


Figure 2-5 : Les principes d'une approche générative [19]

#### 2.4.4 Des compétences informatiques nécessaires

Pour parvenir à ces résultats, mes travaux de recherches nécessitent donc des compétences informatiques et une veille des technologies informatiques disponibles et apparaissantes.

### 2.5 Les paradigmes successifs d'objets, de composants et de services

Cette partie traite principalement des paradigmes informatiques d'objets de composants et de services [20] pour la mise en œuvre des codes définissant nos modèles ou nos outils d'analyse, et comment ils peuvent répondre aux enjeux de prise en compte de couplages dynamiques.

#### 2.5.1 3 niveaux hiérarchiques

Comme l'illustre la figure suivante [19], une structure hiérarchique à 3 niveaux de granularité peut être définie en termes de réutilisation [21]. Le concept de services qui agrège celui de composants, agrégeant lui-même celui d'objets. Chaque couche offrant ses propriétés entre terme de compromis de dynamique et de force de couplage.

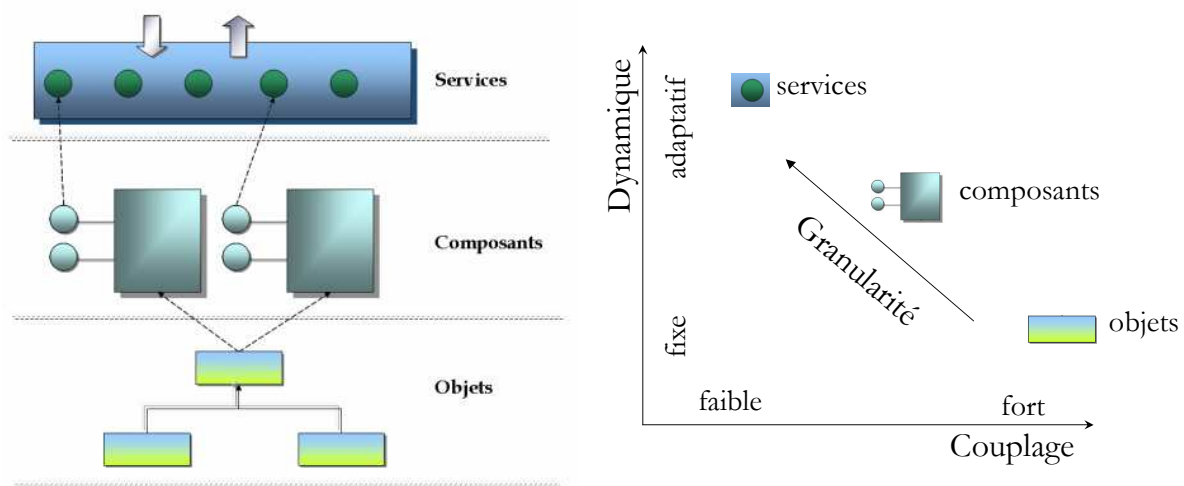


Figure 2-6 : Architecture hiérarchique à objets/composant/services, et compromis dynamique / couplage

La couche immédiatement supérieure à la couche « services » correspondra à l'*orchestration de services* ou *workflow*, c'est-à-dire l'enchaînement de ceux-ci de manière séquentielle ou parallèle, bouclé, conditionnel, synchrone ou asynchrone, etc. Ceci se réalise dans le cadre conceptuel des *Architectures Orientées Services* (en anglais SOA).

#### 2.5.2 Des objets aux composants

Le composant logiciel s'est vu utilisé depuis les années 90 dans le domaine de l'ingénierie informatique [22]. De la même façon que ce paradigme est utilisé pour concevoir des circuits électroniques, un logiciel informatique peut être constitué de composants que l'on assemble.

La réutilisation est le mot clé associé à la notion de composants. En ingénierie de programmation, une réutilisation à base de composants propose une vision différente de celle associée à la notion de programmation objet [22]. La principale différence vient d'une définition plus claire et plus sûre de ce que peut faire et de ce que requiert le composant pour fonctionner. En d'autres termes, un composant spécifie les couplages grâce auxquels il lui est possible d'interagir avec d'autres composants. Contrairement à un composant, un objet (au sens de la programmation objet) peut utiliser des services externes sans avoir à le spécifier, pouvant conduire à des réutilisations non sécurisées (cf. Figure 2-7).

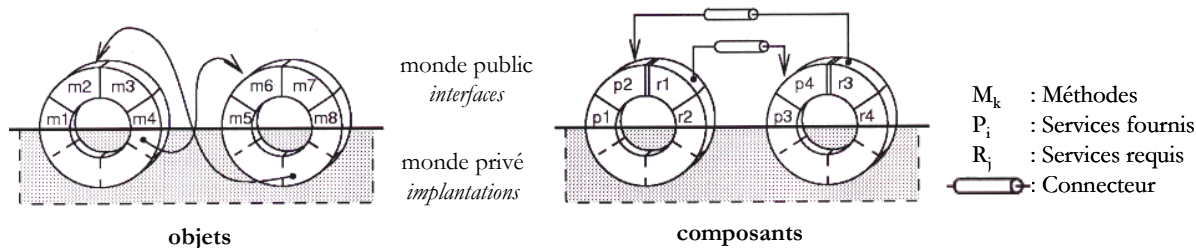


Figure 2-7 : Contrairement à l'approche « objets », l'approche « composants » explicite les services qu'il requiert pour fonctionner.

Un composant sera donc vu de la manière suivante (Figure 2-8), décrivant : ses services requis, ses services fournis et ses paramètres.

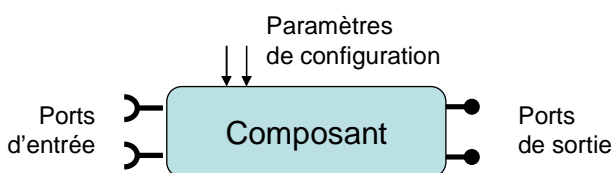


Figure 2-8 : Représentation graphique d'un composant avec ses ports d'entrée/sortie et ses paramètres de configuration

Diverses implémentations de composants logiciels sont industrialisées (COM+<sup>4</sup>, EJB<sup>5</sup>, CCM<sup>6</sup>), et de nombreux autres modèles existent (Fractal, SOFA, OpenCOM, ArchJava, , FuseJ, K-Component...) ayant chacun divers apports non fonctionnels (distribution, interopérabilité, sécurité, persistance, ...) ainsi que différents modes de gestion des cycles de vies (statiques, dynamique).

La vision fonctionnelle d'un composant informatique peut également se décliner pour des modèles de simulation, des algorithmes d'intégration d'équation différentielles, des modèles de dimensionnement, des algorithmes d'optimisation, etc. Ces déclinaisons doivent être formalisées afin d'être mises en œuvre dans nos environnements de CAO. Nous étudierons quelques exemples dans la partie suivante associée au framework CADES.

Un composant peut être défini comme une unité de composition [23]. Il est en effet créé dans un contexte déterminé d'une architecture de composants, pour y être connectée à d'autres entités [24]. La Figure 2-9 présente le concept de composition récursive qui vise à définir des niveaux hiérarchiques de composition. Le composant résultant est appelé composant composite.

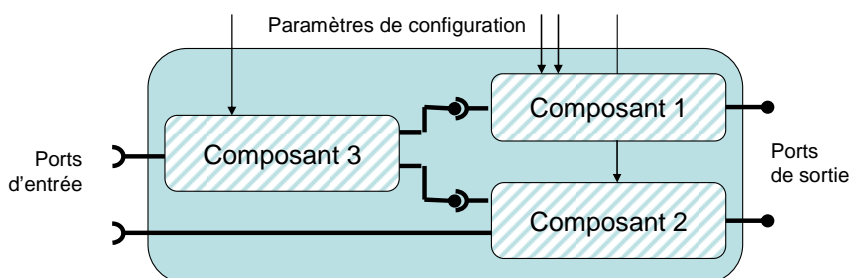


Figure 2-9 : Représentation graphique d'une composition récursive définissant un composant composite

<sup>4</sup> COM+ : .NET framework Component Object Model (Microsoft)

<sup>5</sup> EJB : Enterprise JavaBean (Sun Microsystems, Oracle Corporation depuis 2009)

<sup>6</sup> CCM : Corba Component Model (OMG : Object Management Group)



Les avantages attendus des composants sont donc en terme de

- capitalisation / réutilisation :
  - Développements des modèles ou des processus raccourcis grâce à la réutilisation,
  - Réutilisation de codes robustes (déjà testés, garantissant des résultats, ...).
- composition :
  - Construction de systèmes par assemblage de composants disponibles sur étagère,
  - Amélioration de la modularité, développement plus abstrait (fonctionnel), système plus maintenable (échange de composants), extensibilité des applications en temps réel (composition dynamique),
  - Système portable et distribuible (grâce à la gestion des communications inter-composants).

Dans le cadre d'un environnement visant le couplage dynamique, nous travaillons depuis plusieurs années, à montrer que les composants logiciels offrent un cadre formel permettant le développement de méthodes automatisables garantissant, en association aux techniques de génération automatique de code, une dynamique de composition permettant de gérer une part de la complexité du système « conception ».

### 2.5.3 Des architectures orientées services aux composants orientés services

L'approche à services [25] est basée sur le patron *fournisseur/consommateur* dans lequel un ensemble de fournisseurs de services (e.g. un service de calcul) se mettent à disposition d'éventuels consommateurs. Le mécanisme permettant d'atteindre cette fonctionnalité dynamique est celui du triptyque « publication, découverte et invocation » comme le montre la Figure 2-10. Les services se *publient*, quand ils sont disponibles, puis, lorsqu'un consommateur a besoin d'un service particulier, il le *découvre* dans le registre de services via un *contrat de service*, puis il l'*invoque* pour l'exploiter. Selon [25], les services sont des entités computables, auto descriptibles, et indépendantes de la plateforme d'exécution.

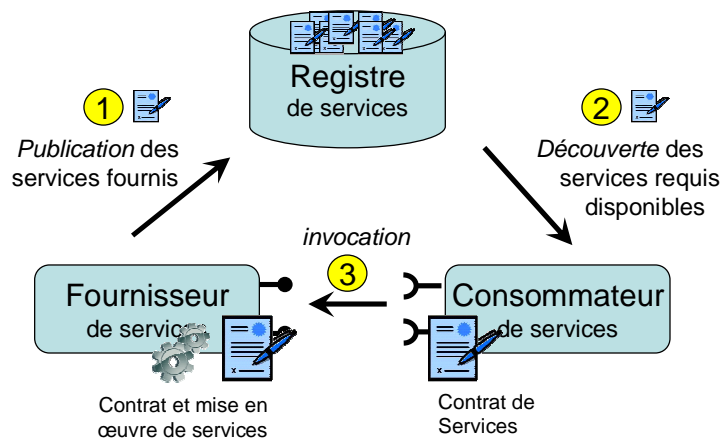


Figure 2-10 : Triptyque « publication, découverte et invocation »

L'approche à service nécessite en effet un couplage faible entre les services et les systèmes d'exploitation, le langage de programmation ou les autres technologies que sous-tendent les codes informatiques. Les développeurs rendent accessibles leurs services sur un réseau afin de permettre aux utilisateurs de les combiner et de les réutiliser dans un but plus global. Ces services et leurs consommateurs correspondants, communiquent les uns avec les autres par le passage de



données sur un bus de communication, dans un format commun, via des activités de coordination

Cette approche a été formalisée dans les SOA (Service Oriented Architecture) tels que les *Web Services* ou de nombreuses autres mises en œuvre (JINI, OpenWings, Corba, UPnP, ...).

SOA est défini selon OASIS<sup>7</sup> comme un nouveau paradigme pour l'organisation et l'utilisation de capacités qui peuvent être distribués via le réseau, sous le contrôle et la propriété de différents acteurs. Il fournit un moyen uniforme d'offrir, de découvrir, d'interagir avec ces capacités et de les utiliser afin de produire les effets désirés, compatibles avec des conditions définies au préalable et des attentes mesurables.

Une déclinaison de l'approche SOA a été introduite pour y apporter la contribution de l'approche à composants, et fusionner l'aspect dynamique de découverte des services et l'approche de composition récursive de composants. Il s'agit par exemple du modèle SCA (Service Component Architecture) pour la composition de services Web, du modèle iPOJO<sup>8</sup> pour la composition structurelle de services OSGi<sup>9</sup> ou de l'approche SOMA d'IBM décrite dans la Figure 2-11

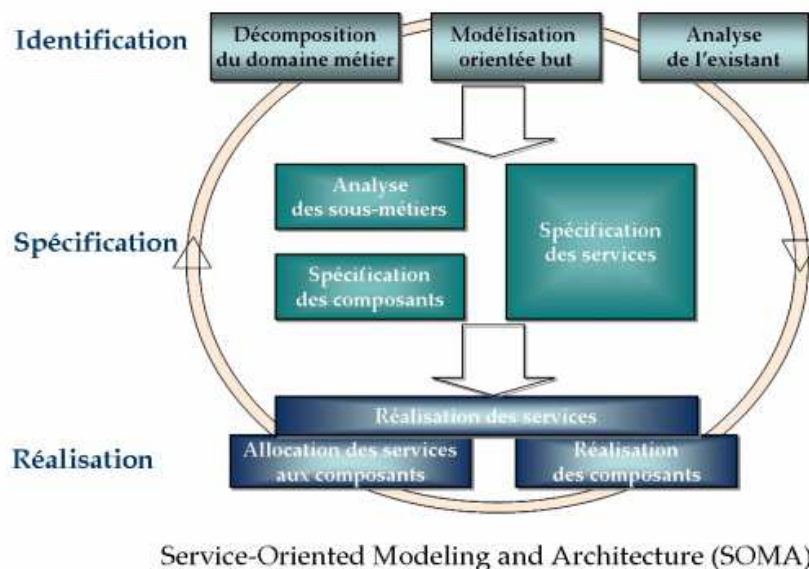


Figure 2-11 : Architecture et Modélisation Orientée Service (SOMA) [21].

Nous travaillons aujourd'hui sur cette approche à services avec les technologies OSGi et WebServices dans le but de préparer les environnements de CAO de demain qui travailleront via Internet, qui offre, à un niveau de granularité assez élevé, des capacités de capitalisation et de couplage infinies.

<sup>7</sup> OASIS : Advancing open standards for the information society, [www.oasis-open.org](http://www.oasis-open.org)

<sup>8</sup> iPOJO : injected POJO, <http://cwiki.apache.org/confluence/display/FELIX/iPOJO>

<sup>9</sup> OSGI : [www.osgi.org](http://www.osgi.org)

## **2.6 Vers le « cloud computing »**

### *2.6.1 Rappel historique*

Avant l'avènement du « Personal Computer », des terminaux (clavier et écran) se partageaient l'accès à un super ordinateur « mainframe » en raison de son coût et de son encombrement. Le PC a révolutionné l'accès à une capacité de calcul qui est devenue dédiée à chaque utilisateur. Pour des besoins de puissance de calcul, des stations de travail ont été proposées pour travailler exclusivement sur certains outils tels que ceux de CAO. Le besoin de puissance n'ayant semble-t-il aucune limite, la parallélisation sur des grilles de calcul ont décuplé les temps de simulation de codes de calcul parallélisables. Aujourd'hui les PC exploitent cette capacité de parallélisation en interne avec les architectures multi cœur. Ce va et vient incessant entre capacité de calcul local et distribué nous conduit naturellement aujourd'hui vers le « cloud computing », c'est-à-dire une dématérialisation de la capacité de calcul via le réseau Internet.

### *2.6.2 Internet*

La révolution d'Internet a offert les capacités « réseau » aux PC. La première conséquence a été l'échange d'information « statique » entre individus. Puis, sous la dénomination de web 2.0, ce contenu est devenu dynamique, modifiable en temps réel. Cette capacité de communication entre acteurs est un outil réel pour assurer la collaboration dans toutes les phases d'un projet de conception. Le site de partage de modèles DIMOCODE que nous avons mis en place, par la mise en relation de modélisateurs, apporte une assistance à la capitalisation de connaissances, puis à l'appropriation et la réutilisation. Outre les solutions de collaboration entre individus, Internet offre également une capacité de calcul distribuée phénoménale.

### *2.6.3 Dématérialisation*

La dématérialisation ou la virtualisation consiste à bénéficier d'un flux de données sans se préoccuper des problématiques de son stockage et de son traitement. Cela peut changer considérablement la manière de travailler pour un concepteur. En particulier, cela permet de disposer de logiciels dématérialisés dont l'utilisation occasionnelle devient beaucoup plus accessible. Il ne s'agirait plus d'acheter une licence d'un unique logiciel de CAO, mais d'acheter des droits d'utilisation « à distance » de N logiciels ou capacité de calcul, qui seraient exploités de manière couplée au cas par cas, dynamiquement, en fonction des objectifs de conception. Le « cloud computing » se caractérise ainsi par cette virtualisation du calcul, ne conservant en local que les interactions avec le concepteur (IHM). Les paradigmes de composants et de services, présentés précédemment, offrent cette possibilité de travail que nous investiguons dans le cadre des modèles de calcul et des outils CAO.

### *2.6.4 Conception distribuée mais collaborative*

La conjonction des capacités de communication entre concepteurs via le web 2.0, avec les modèles et capacités de calcul virtualisés, offre également des perspectives nouvelles à la conception collaborative. Les interactions entre concepteurs, entre experts composant ou avec un intégrateur système, viennent ajouter une dimension supplémentaire dans la dynamique et la complexité que devront supporter les outils de CAO du futur via le « cloud computing ». L'échange de modèle pourra se faire de manière plus simple via l'échange de services de calcul, facilitant l'intégration des acteurs et de leurs différents métiers dans un système de conception global.

## **Conclusions**

Nous avons vu dans cette partie quels étaient les enjeux scientifiques en terme de prise en compte de la complexité et de la dynamique de conception de systèmes. Associées à ces enjeux, des solutions méthodologiques informatiques peuvent apporter un support adapté à ces objectifs. En particulier, la complexité peut être prise en compte par une meilleure gestion des couplages en favorisant la formalisation d'interactions suffisamment souples tout en garantissant un échange d'information nécessaire à une bonne modélisation.

Nous allons voir dans la partie suivante, que la norme ICAr de composant logiciel que nous proposons vise à prendre en compte cette complexité en formalisant un certain nombre de services métiers ou « facettes », tels que le dimensionnement ou la simulation dynamique. L'approche générative doit également permettre de répondre aux contraintes de dynamique de modélisation. C'est ce que visent en particulier nos travaux sur la génération automatique de modèles du framework CADES et des modèles métiers de MacMMems ou Reluctool.

## **Bibliographie**

- [1] Lalao Harijaona RAKOTOARISON « Méthode et outil de génération automatique de modèle pour l'optimisation fortement contrainte des microsystèmes magnétiques », thèse de l'INPG, soutenue le 29 novembre 2007
- [2] B. Delinchant, V. Riboulet, L. Gerbaud, P. Marin, F. Noël, F. Wurtz "Cooperative Design among Mechanical and Electrical Engineers over the Internet: some Implications for Tools supporting Human Communication Between Various Professional Cultures", IEEE Transactions on Professional Communication. Special Issue: International Communication, Technology, and Culture. Vol. 45, No. 4, Dec. 02, pp. 231-249, ISSN 0361-1434.
- [3] B. Delinchant, E. Atienza, L. Gerbaud, F. Wurtz, "Concurrent design versioning system, based on XML file", dans les actes de IECON'02, 28th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Sevilla, Espagne, Nov. 5-8 2002. ISBN: 0-7803-7474-6, pp 2485-2490
- [4] B. Delinchant, F. Wurtz, « Une architecture à base de composants logiciels pour la capitalisation et la ré - utilisation de connaissances formelles dans les bureaux de R&D » Colloque IPI '04 "Information, Compétences et Connaissances dans les systèmes productifs" Autrans, 22 – 23 janvier 2004, pp 273-285
- [5] B. Delinchant, V. Riboulet, "Modes de communication et échanges d'information en conception distribuée via internet" Colloque IPI '02 (Institut de la Production et des organisations Industrielles) "Concevoir et organiser la performance industrielle" Autrans, 28-29-30 janvier 2002.
- [6] V. Riboulet, B. Delinchant, L. Gerbaud, P. Marin, N. Noel, "Tools for dynamic sharing of collaborative design information", actes de IDMM'02, 4th International Conference on Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering, Clermont-Ferrand, France, 14-16 mai 2002.
- [7] Frédéric Wurtz, Laurent Krähenbühl, Claude Marchand, Christophe Espanet, Stéphane Brisset, Franck Pourroy, Dominique Rieu, Béatrice Fuchs « Vers de nouvelles approches pour la capitalisation des modèles pour la simulation et l'optimisation : l'expérience du projet DIMOCODE », NUMELEC 2008, Liège : Belgique, 08/12/2008.
- [8] Frédéric Wurtz, *Conceptions de la conception pour le génie électrique: de l'approche « Objets –Savoirs – Méthodes – Outils » à l'approche « Systèmes – Connaissances – Compétences - Organisations »*, HDR soutenue à l'INPG le 03/04/2008

- [9] Ludwig von Bertalanffy, Anatol Rapoport, Ralph W. Gerard, Kenneth Boulding "Society for General Systems Research", 1956.
- [10] Joël de Rosnay, « The Macroscope » sur Principia Cybernetica Web, Harper & Row, 1979
- [11] Edgar Morin « La Nature de la nature », tome 1 de « La Méthode » (6 volumes), Le Seuil, Nouvelle édition, coll. Points, 1977
- [12] Jean-Louis Le Moigne, « La modélisation des systèmes complexes », 1990, Éd. Dunod. Réédité en 1995.
- [13] B. Chandrasekaran, A.K. Goel, Y. Iwasaki, "Functional representation as design Rationale", IEEE computer, Vol 1, Jan 1993, pp 48-56.
- [14] F. Darses, F. Détienne, W. Visser « Assister la conception : perspectives pour la psychologie cognitive ergonomique », ÉPIQUE 2001, Actes des Journées d'étude en Psychologie ergonomique, Nantes, IRCCyN, France, 29-30 Octobre 2001
- [15] J.Z. Chen, Y. Wu, C. Gence, D. Borojevich, J.H. Bøhn, "Integrated Electrical and Thermal Analysis of Integrated Power Electronics Modules Using iSIGHT," Proc., 2001 CPES Power Electronics Seminar, Blacksburg, VA, April 23-25, 2001, pp. 141-145
- [16] Pressman, Roger S., "Software Engineering: A Practitioner's Approach", Third Edition, McGraw-Hill, Inc., New York, 1992
- [17] Clément Escoffier « iPOJO : Un modèle à composant à service flexible pour les systèmes dynamiques », thèse Informatique de l'Université Joseph Fourier, soutenue le 03/12/2008
- [18] Krzysztof Czarnecki "Overview of generative software development", In Proceedings of Unconventional Programming Paradigms (UPP) 2004, 15-17 September, Mont Saint-Michel, France
- [19] Cristina Marin, « Une approche orientée domaine pour la composition de services », thèse Informatique de l'Université Joseph Fourier, soutenue le 30 mai 2008
- [20] Didier DONSEZ « Objets, composants et services : intégration de propriétés non fonctionnelles », HDR Informatique, 11/12/2006
- [21] M. Endrei and al, "Patterns: Service-oriented architecture and web services", <http://www.redbooks.ibm.com/redbooks/pdfs/sg246303.pdf>, 2004
- [22] C. Szypersky, "Component Software – Beyond Object-Oriented Programming", Addison-Wesley, 1998
- [23] F. Barbier, C. Cauvet, M. Oussalah, D. Rieu, S. Bennisari, C. Souveyet « Composants dans l'ingénierie des systèmes d'information : concepts clés et techniques de réutilisation », actes des deuxièmes assises nationales du GdR I3 (Information - Interaction - Intelligence). Nancy, déc. 2002.
- [24] T.D. Meijler and O. Nierstrasz, "Beyond Objects: Components," Cooperative Information Systems: Current Trends and Directions, M.P. Papazoglou and G. Schlageter (Eds.), pp. 49-78, Academic Press, November 1997
- [25] M. P. Papazoglou, Service -oriented computing : Concepts, characteristics and directions, Fourth International Conference on Web Information Systems Engineering (WISE'03) (2003).
- [26] Bell Michael "SOA Modeling Patterns for Service-Oriented Discovery and Analysis". Wiley & Sons. pp. 390. ISBN 978-0470481974.

---

<b>3</b>	<b>CADES : Un environnement pour le couplage de modèles et d'outils d'analyse</b>	
3.1	L'Histoire	55
3.2	Une architecture modulaire	55
3.2.1	CADES « standard »	56
3.2.2	CADES « métier »	56
3.2.3	CADES Plug'in	56
3.3	Le langage de modélisation SML	57
3.3.1	Modélisation analytique / algorithmique	57
3.3.2	Des boîtes multicolores	58
3.3.3	Composition « boîte grise »	59
3.4	Les composants logiciels ICAr	60
3.4.1	ICAr : une norme de composants multifacettes	60
3.4.2	Découverte dynamique des services offerts par le composant	60
3.4.3	Du générateur métier à l'application métier	61
3.4.4	Bus logiciel à base de composants pour assurer l'interopérabilité	62
3.5	L'optimisation	63
3.5.1	Dimensionnement sous contraintes	63
3.5.2	Calcul de Jacobien	64
3.5.3	Facette « JacobianSolver » d'ICAr	64
3.5.4	Composition des dérivées	64
3.5.5	Algorithmes d'optimisation	65
3.6	La simulation dynamique	65
3.6.1	Contexte de recherche	65
3.6.2	Modèles dynamiques ODE	65
3.6.3	Modèles dynamiques DAE	67
3.6.4	Génération de composants ICAr dynamiques	67
3.6.5	Simulation couplée, simulation système	67

### 3 CADES : Un environnement pour le couplage de modèles et d'outils d'analyse

Dans cette partie, je vais décrire le framework CADES auquel la plupart de mes travaux contribuent, et qui vise en particulier à répondre à la problématique de couplage que je traite. CADES rassemble un groupe de personnes de l'équipe MAGE autour de son développement collaboratif que j'anime depuis 4 ou 5 années.

#### 3.1 L'Historique

L'environnement CADES, ainsi nommé pour signifier « Component Architecture for the Design of Engineering Systems », est issu des travaux du G2Elab initiés par Laurent Gerbaud [1] sur la génération automatique de modèles dynamiques, et Frédéric WURTZ [2] pour réaliser l'optimisation sous contraintes de modèles analytiques dérivés automatiquement. Aujourd'hui, CADES correspond plutôt à une architecture permettant la génération et le traitement automatique de modèles pouvant être décrits sous une forme analytique et/ou algorithmique ou dans une forme plus « métier » telle qu'une description géométrique ou un circuit électrique équivalent. Une particularité forte a été conservée depuis l'origine, il s'agit du calcul automatique des gradients du modèle facilitant largement les procédures d'optimisation sous contraintes et l'analyse de sensibilité.

Très rapidement, dans les années 2000, le paradigme des composants logiciels a été introduit dans la thèse d'Eric Atienza [4] en particulier pour assurer le couplage aisé aux algorithmes d'optimisation. J'ai ensuite contribué dans ma thèse [3] aux réflexions sur les composants logiciels avec en particulier la notion d'encapsulation de modèle et de pilotage de logiciels dans des composants et la notion de composition de modèles.

A la suite de ces travaux, la société Design Processing Technologies S.A., créée 2002 dans le cadre de la loi sur l'innovation, édite une version industrielle, le logiciel Pro@DESIGN.

Suite à cette valorisation, notre équipe de recherche est répartie sur de nouvelles bases en définissant en particulier une nouvelle norme de composant dans la thèse de Vincent Fischer [7][29]. Depuis, de nombreux travaux de recherche ont permis de faire évoluer les fonctionnalités et les performances de notre environnement (Loig Allain [5], David Magot [6], Bertrand Du Peloux [8], Lalao Rakotoarison [9], Petre Enciu [11], Phuong Pham-Quang [15]) et de lui adjoindre des outils amonts de modélisation (Reluctool [8], MacMMems [9], ECM [10]).

CADES est utilisé en enseignement à Grenoble (université et école d'ingénieur) en recherche dans plusieurs laboratoires en France et chez plusieurs partenaires industriels. Les domaines applicatifs couvrent globalement les thématiques du génie électrique.

CADES est aujourd'hui dans une seconde phase de valorisation avec la création de la société Vesta-System ([www.cades-solutions.com](http://www.cades-solutions.com)) ce qui crée une dynamique très forte et un travail collaboratif très important.

#### 3.2 Une architecture modulaire

Définissons dans un premier temps quelques acronymes utilisés et qui seront détaillés par la suite :

- **SML** (System Modelling Language) : il s'agit du langage de modélisation que nous avons développé.

- **ICAr** (Interface for Component Architecture) : il s'agit de la norme de composant logiciel que nous avons développée.

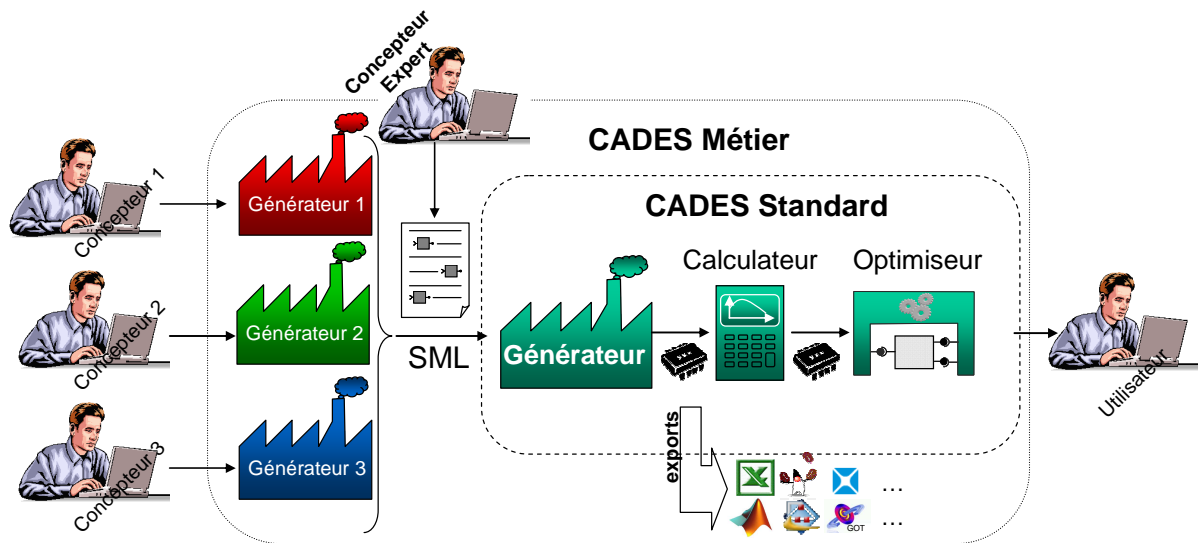


Figure 3-1 : Architecture modulaire de CADES.

### 3.2.1 CADES « standard »

Il s'agit de la version minimale pour réaliser de l'optimisation à partir de modèles analytiques. CADES standard est constitué de :

- Un générateur de composants ICAr à partir d'une description SML du modèle.
- Un outil de calcul et d'analyse du modèle.
- Un outil d'optimisation.

### 3.2.2 CADES « métier »

Il s'agit d'une extension de la version standard, incluant des générateurs de modèles (langage SML ou composant ICAr), issus d'une description métier du dispositif :

- Réseau de reluctance
- MEMS magnétiques
- Circuits électriques

### 3.2.3 CADES Plug'in

Des « plug'in » pour divers environnements permettent d'utiliser les modèles en dehors de CADES :

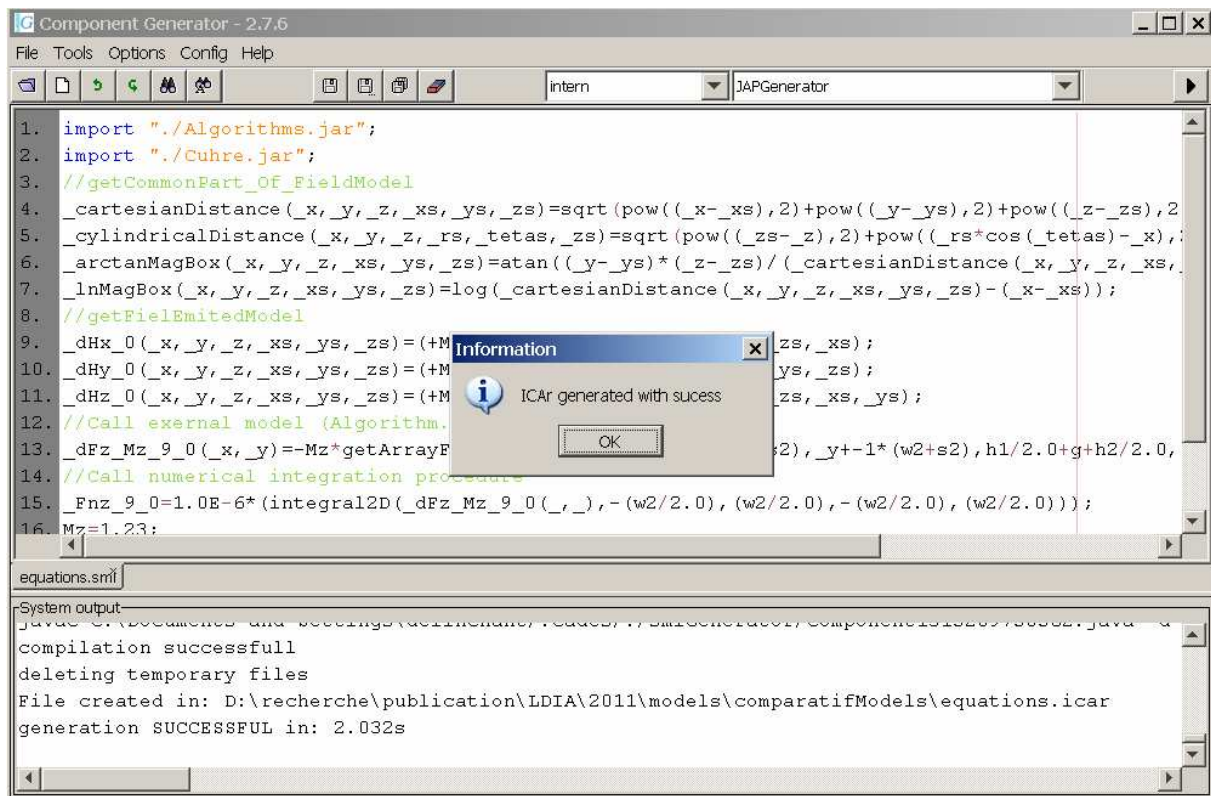
- Matlab / Simulink
- Excel
- Modelica
- Portunus
- iSight
- ...

### 3.3 Le langage de modélisation SML

#### 3.3.1 Modélisation analytique / algorithmique

Nous avons construit le langage SML (System Modelling Language) car de nombreuses spécificités (notion de librairie de calculs, mots clés spécifiques) font qu'il n'existe pas d'équivalent. Ce langage nous permet principalement de décrire un modèle analytique par :

- des fonctions et équations mathématiques (Figure 3-2)
- des algorithmes (Figure 3-3)
- des appels de codes externes (bibliothèque)



```
1. import "../Algorithms.jar";
2. import "../Cuhre.jar";
3. //getCommonPart_OF_FieldModel
4. _cartesianDistance(_x,_y,_z,_xs,_ys,_zs)=sqrt(pow((_x-_xs),2)+pow((_y-_ys),2)+pow((_z-_zs),2);
5. _cylindricalDistance(_x,_y,_z,_rs,_tetras,_zs)=sqrt(pow((_zs-_z),2)+pow((_rs*cos(_tetras)-_x),2);
6. _arctanMagBox(_x,_y,_z,_xs,_ys,_zs)=atan((_y-_ys)*(_z-_zs)/(_cartesianDistance(_x,_y,_z,_xs,_ys,_zs)));
7. _lnMagBox(_x,_y,_z,_xs,_ys,_zs)=log(_cartesianDistance(_x,_y,_z,_xs,_ys,_zs)-(_x-_xs));
8. //getFielEmitedModel
9. _dHx_0(_x,_y,_z,_xs,_ys,_zs)=(+Mz*_dHx_0(_x,_y,_z,_xs,_ys,_zs);
10. _dHy_0(_x,_y,_z,_xs,_ys,_zs)=(+Mz*_dHy_0(_x,_y,_z,_xs,_ys,_zs);
11. _dHz_0(_x,_y,_z,_xs,_ys,_zs)=(+Mz*_dHz_0(_x,_y,_z,_xs,_ys,_zs);
12. //Call external model (Algorithm);
13. _dFz_Mz_9_0(_x,_y)=-Mz*getArrayF...;
14. //Call numerical integration procedure;
15. _Fnz_9_0=1.0E-6*(integral2D(_dFz_Mz_9_0(_,_),-(w2/2.0),(w2/2.0),-(w2/2.0),(w2/2.0)));
16. Mz=1.23;
```

equations.smf

System output:  
javac C:\Documents and Settings\delphine\Local Settings\Application Data\component152878882\java...  
compilation successfull  
deleting temporary files  
File created in: D:\recherche\publication\LDIA\2011\models\comparatifModels\equations.icar  
generation SUCCESSFUL in: 2.032s

Figure 3-2 : Générateur de modèles décrits par des équations (langage SML)



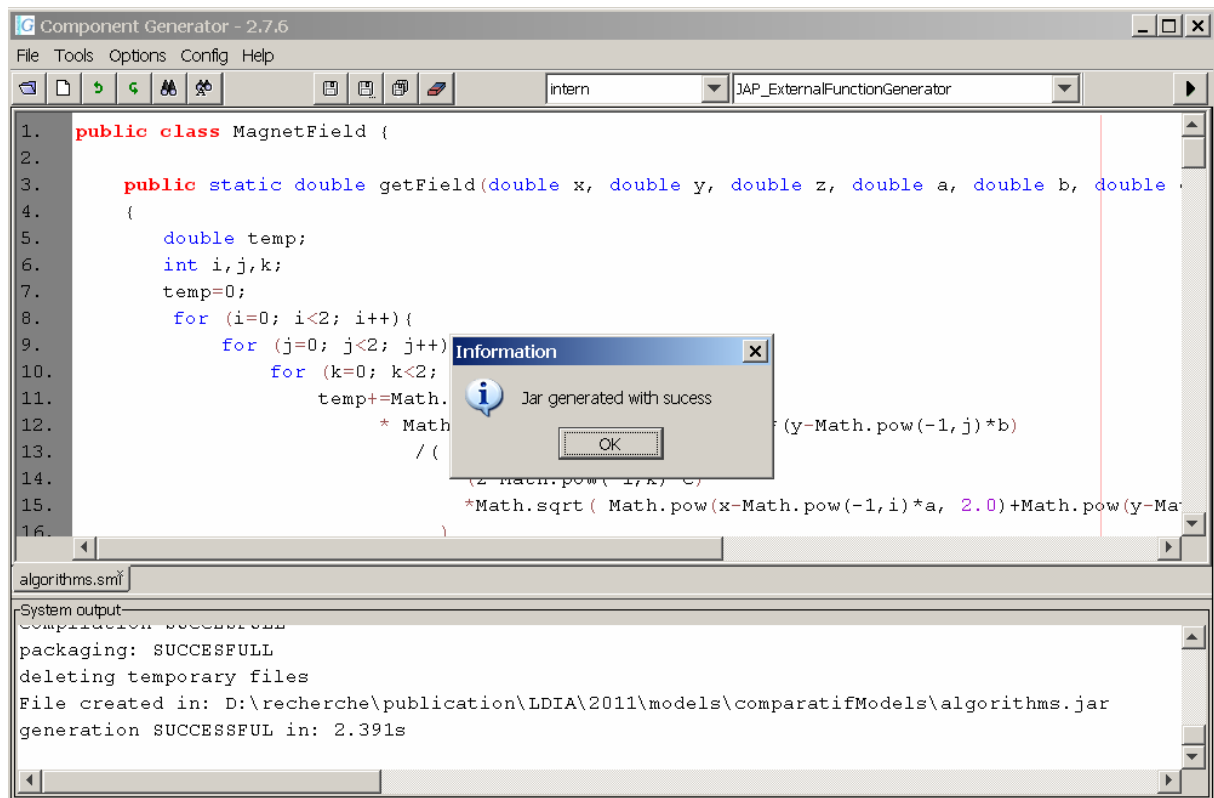


Figure 3-3 : Générateur de modèles décrits par des algorithmes (Java ou C)

### 3.3.2 Des boîtes multicolores

Nous définissons les concepts de « boîte blanche », « boîte noire » et « boîte grise ». Le concept de « boîte noire » est classique et provient de la cybernétique, il permet d'appréhender un objet sans connaissance nécessaire sur sa constitution interne. Seul les relations entre les entrées et les sorties peuvent être observées, correspondant à son comportement et plus à sa constitution. Par opposition à la « boîte noire », la « boîte blanche » pourra selon le cas être utilisée pour son comportement liant les entrées aux sorties, ou bien être exploitée par la connaissance de sa constitution interne pour réorienter les équations par exemple [5].

Le langage SML correspond à une « boîte grise » dans le sens où il est capable de décrire des modèles « boîte blanche » (équations, algorithmes) ainsi que des codes externes « boîte noire » et de les composer.

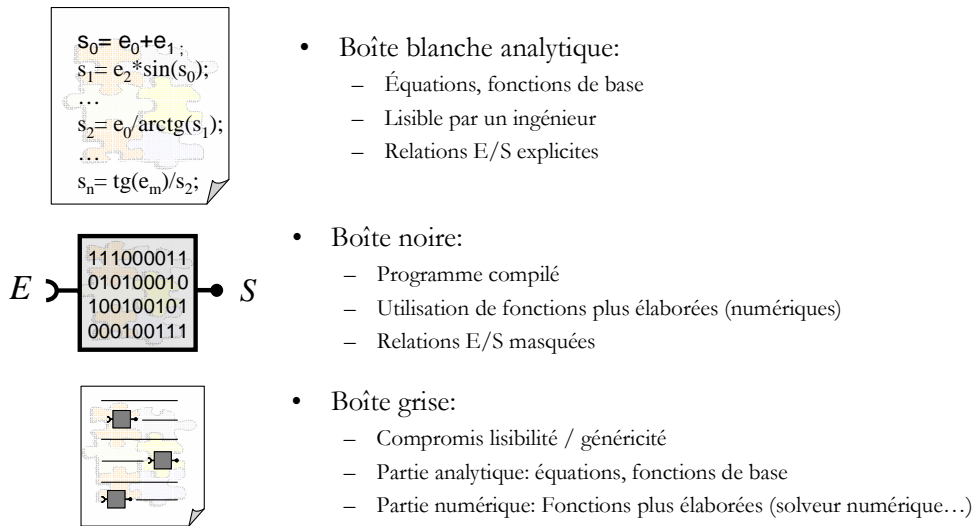


Figure 3-4 : Boîtes blanche, noire et grise

### 3.3.3 Composition « boîte grise »

La composition du modèle analytique avec des codes une bibliothèque de calculs externes peut se faire de deux manières, avec ou sans « call back ». La notion sans « call back » correspond à une simple fonction, cela signifie que le code externe n'interagit pas avec le modèle, il calcule des sorties en fonction des entrées fournies par le modèle. Cela peut être illustré par l'exemple suivant dans lequel le code externe correspond à la fonction « Interpolate » [13]

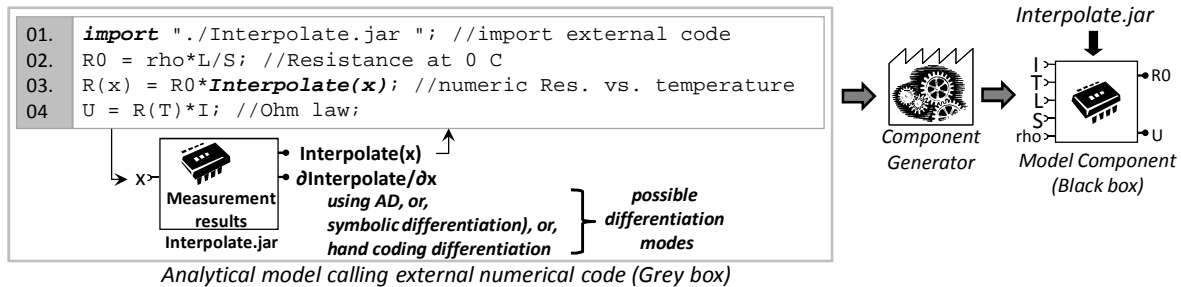


Figure 3-5 : Composition boîte grise sans « call back »

La notion avec « call back » correspond à la possibilité qu'a le code externe de pouvoir interroger le modèle. Dans l'exemple suivant, la fonction « integral » exploite la fonction « invS(a,x) » définie dans le modèle. Dans ce cas, le couplage est un couplage plus fort que dans le premier cas où seules des valeurs étaient transmises, ce qui requiert des spécifications d'interface plus complexes.

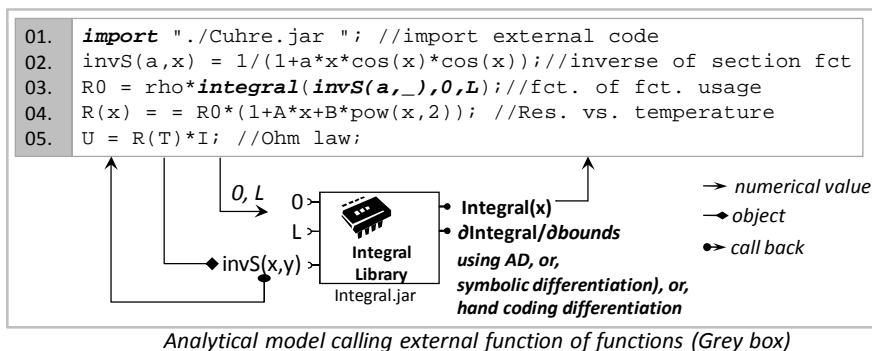


Figure 3-6 : Composition boîte grise avec « call back »

### 3.4 Les composants logiciels ICAR

#### 3.4.1 ICAR : une norme de composants multifacettes

Un composant ICAR sera généralement associé à un composant physique. L'ICAR peut proposer plusieurs vues du dispositif comme un modèle de calcul, un calcul de sensibilité, une documentation, une visualisation graphique, etc. Un ICAR pourra également proposer différents modèles physiques (thermique, électrique, ...) ou plusieurs versions du modèle pour des besoins différents (simulation dynamique, optimisation ou pilotage temps réel, ...).



Figure 3-7 : Approche composant multi-facettes

#### 3.4.2 Découverte dynamique des services offerts par le composant

Les outils exploitant les ICAR s'adaptent automatiquement en fonction des facettes (ou services) dont il dispose. Dans les figures suivantes, nous voyons que les onglets que propose l'outil « calculatrice » dépendent du composant chargé.

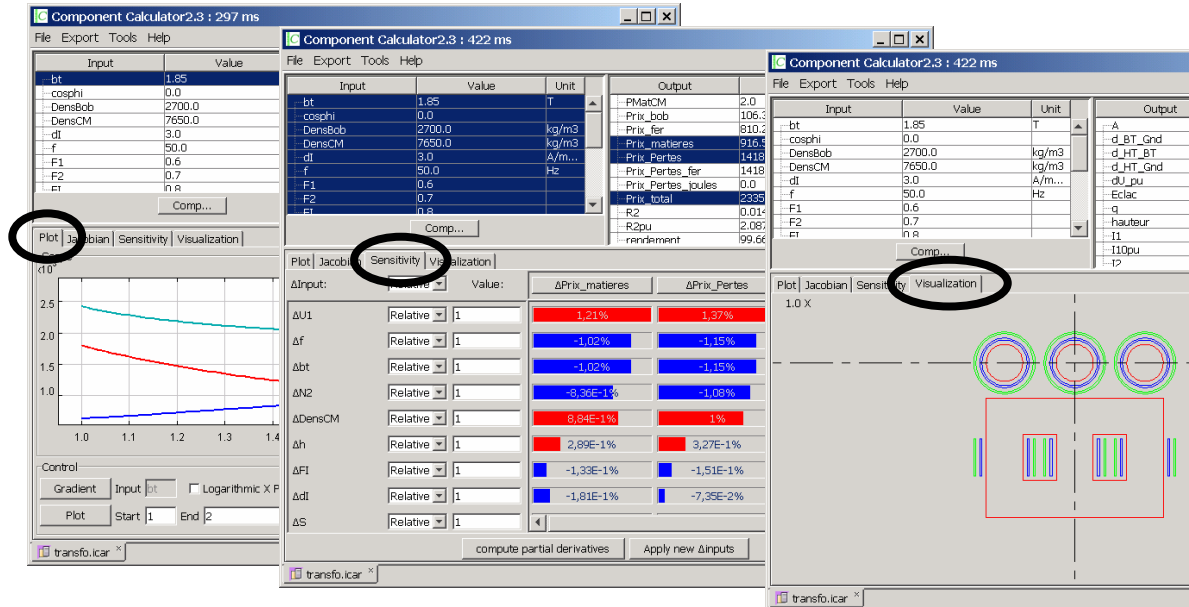


Figure 3-8 : 3 vues du même composant (calcul, sensibilité et visualisation)

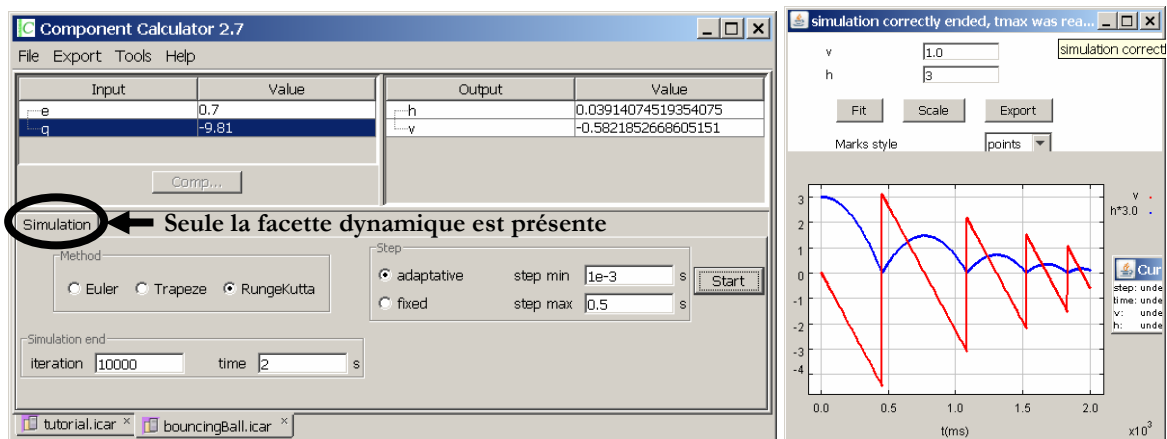


Figure 3-9 : Un composant avec une facette dynamique se connecte automatiquement à un solveur d'ODE

De nombreux services associés aux spécificités des facettes ont été réalisés. Par exemple, une étude de sensibilité pourra être réalisée par simulation de Monte Carlo sur un modèle standard et beaucoup plus rapidement par une approximation locale à l'aide d'une facette fournissant le Jacobien du modèle. Cette dernière offrira également la possibilité d'appliquer des algorithmes d'optimisation sous contrainte de type Quasi-Newton. Une étude de sensibilité pourra aussi être obtenue si le modèle fournit une facette « interval » qui servira par ailleurs à y connecter un algorithme d'optimisation globale [28]. Des telles facettes de sensibilité offrent également au composant des services d'analyse de robustesse [28], et de fiabilité pouvant apparaître également dans les critères d'optimisation [15] grâce aux concepts de composition récursive offerts par les composants.

### 3.4.3 Du générateur métier à l'application métier

Pour modéliser un microsystème avec CADES, un concepteur « standard » ne verra qu'un outil, le modeleur3D de MacMMems, dans lequel il va décrire son système puis générer une « application métier ». Cette application métier sera complètement spécifiée par le composant et ses facettes (modèle de calcul, de sensibilité, et la visualisation 3D paramétrée).

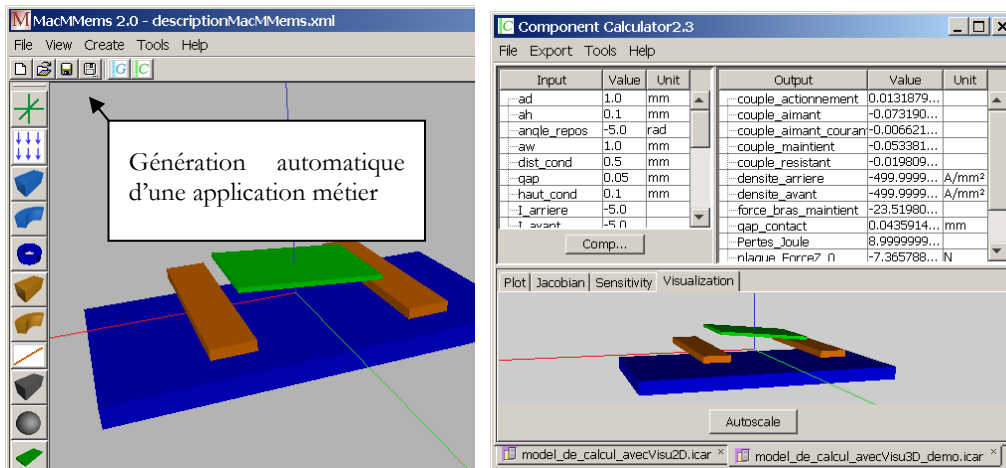


Figure 3-10 : Le générateur métier (gauche) et son application métier correspondante (droite)

En mode expert, l'utilisateur aura la possibilité d'accéder aux équations générées automatiquement par MacMMems, les modifier à volonté puis générer le composant de calcul associé au modèle. Il peut également ajouter d'autres facettes, comme la facette de visualisation qui peut provenir d'un autre outil comme notre modeleur2D.

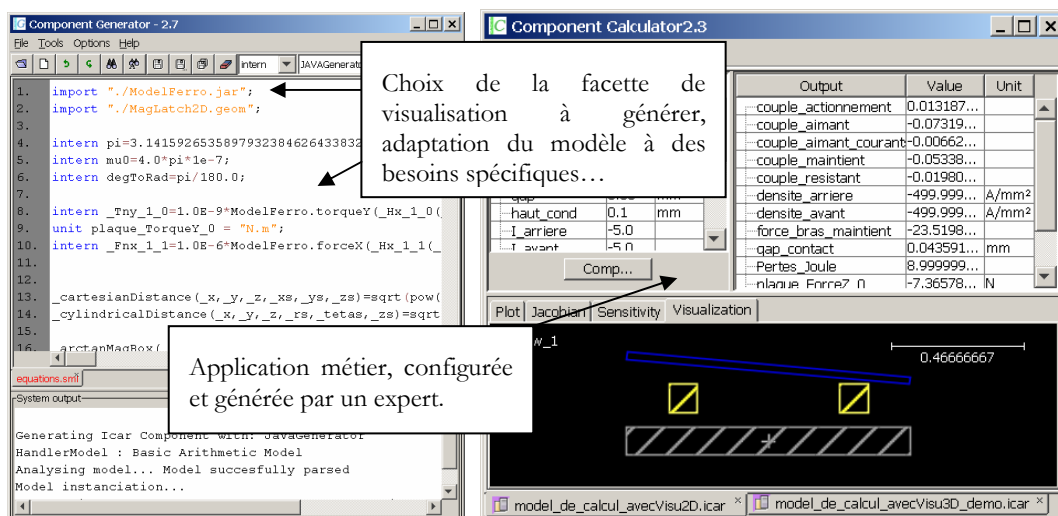


Figure 3-11 : Application métier configurable par le choix des facettes incluses dans le composant

La définition d'une ou plusieurs géométries 2D paramétrées associée à un modèle de calcul est importante durant les phases de dimensionnement. Ainsi, nous avons développé (durant un stage de M2 informatique) un modelleur géométrique paramétré qui génère une facette associable à un composant ICAr (comme dans la figure précédente). Cette géométrie est exploitable également durant la phase de post-processing d'optimisation où elle permet de visualiser l'évolution géométrique au cours des itérations de l'algorithme.

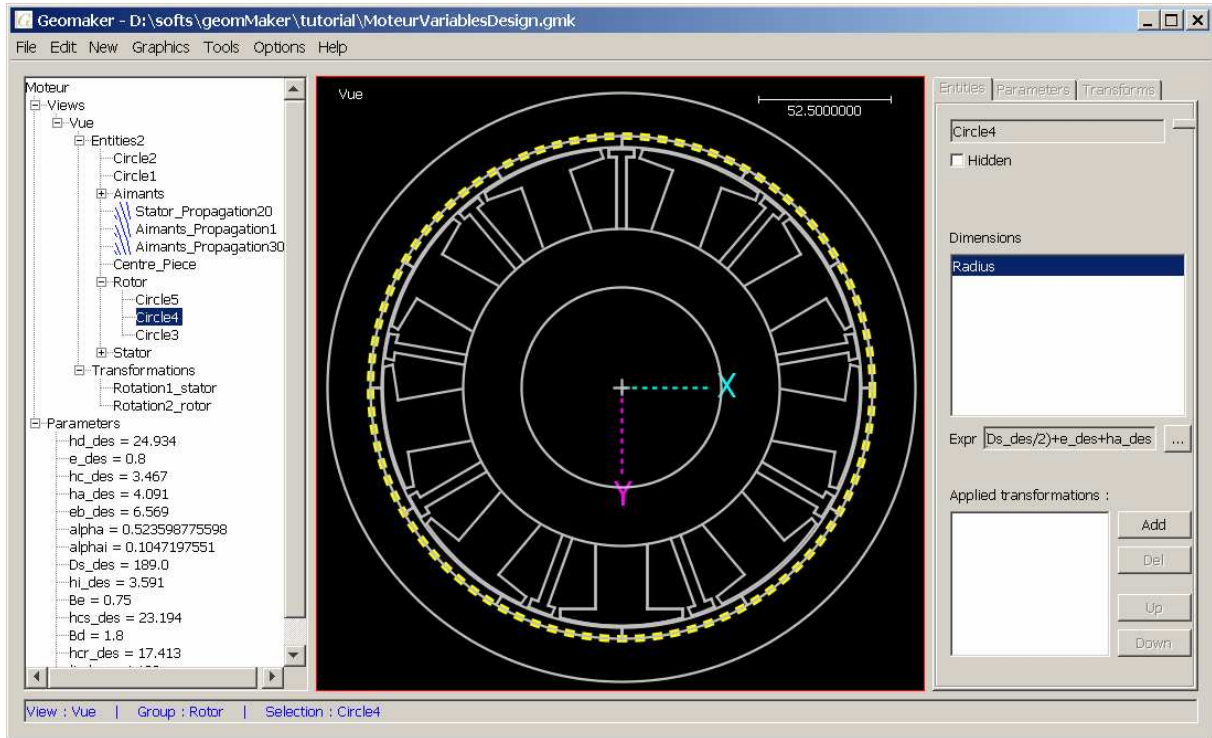


Figure 3-12 : Modelleur2D pour ajouter une facette de visualisation paramétré dans un ICAr ou durant un post-processing d'optimisation. Ici une machine synchrone à aimants.

### 3.4.4 Bus logiciel à base de composants pour assurer l'interopérabilité

L'approche à composants logiciels permet une interopérabilité importante comme l'illustre la Figure 3-13. Nous définissons les termes suivants :

« **Plug-in** » : passerelle définie dans un logiciel (Excel, iSight, Matlab, ...) permettant d'exploiter un composant logiciel. Seules les facettes que le logiciel est capable d'exploiter seront visibles (*en général un modèle de calcul statique ou dynamique*).

« **Plug-out** » : par analogie, il s'agit d'exploiter sous la forme d'un composant logiciel, un modèle (en général) défini dans un logiciel (Modelica, Flux, Matlab, Comfie, ...). C'est une extension du concept de générateur de composant logiciel mais pour laquelle une spécificité importante peut ne pas être garantie, il s'agit de l'autonomie. En effet, certains logiciels n'autorisent que des appels à leur solver (*tout ne peut pas être embarqué dans le composant*) ce qui contraint le composant logiciel à garder une dépendance vers le logiciel. C'est par exemple le cas du logiciel Flux pour lequel une relation client/serveur est établie avec le composant logiciel.

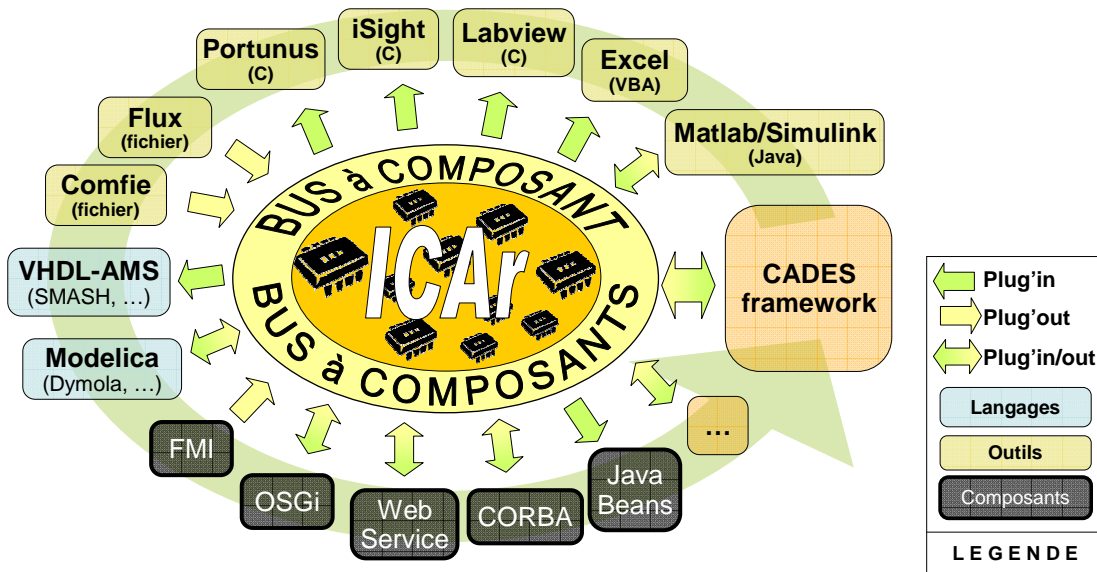


Figure 3-13 : Bus à composants logiciels faisant le liens entre

### 3.5 L'optimisation

#### 3.5.1 Dimensionnement sous contraintes

L'optimisation en ingénierie est aujourd'hui inévitable. Elle intervient dans de nombreuses phases de la modélisation (*identification de modèle issues de mesures*), au dimensionnement, en passant par le diagnostic (*identification de sources*). L'application principale de CADES concerne le dimensionnement optimal pour lequel il s'agit de résoudre un problème inverse consistant à trouver les entrées du modèle (paramètres géométrique et physiques) qui permet d'atteindre des performances optimales tout en respectant un certain nombre de contraintes. Cela s'exprime par le problème mathématique suivant (3-1), dans lequel  $\mathbf{F}(\mathbf{x})$  représente les objectifs à minimiser,  $\mathbf{G}(\mathbf{x})$  les contraintes d'égalité, et  $\mathbf{H}(\mathbf{x})$  les contraintes d'inégalité.

$$\begin{aligned}
 & \text{trouver } x^* \in \mathfrak{R}^n \quad \text{tel que} \\
 & \begin{cases} x^* = \arg \min_{x \in \mathfrak{R}^n} \mathbf{F}(x) \\ \mathbf{G}(x^*) = 0 \\ \mathbf{H}(x^*) \leq 0 \end{cases} \quad (3-1)
 \end{aligned}$$

Pour bien mener un tel dimensionnement il faut maîtriser 3 ingrédients : le cahier des charges, le modèle et l'algorithme. Le cahier des charges va déterminer ce que le modèle doit calculer (les performances et les contraintes en fonction des variables à dimensionner). Le modèle (objectifs et contraintes) est généralement non linéaire à variables continues et potentiellement discrètes, ce qui conditionne une classe d'algorithme d'optimisation. Le choix de l'algorithme est également déterminé par le caractère mono ou multi-objectifs, le besoin de trouver une solution globale ou considérer que le modèle est suffisamment convexe dans la zone de recherche pour préférer un algorithme à convergence locale, etc.

Ce que nous avons pu constater dans la majeure partie des cas, c'est qu'un modèle disposant d'une information de sensibilité locale (gradients) offrait un avantage non négligeable pour la mise en œuvre de stratégies d'optimisation rapides et précises sur des problèmes standards (*plusieurs dizaines de variables et de contraintes*) [17][18][19][20][21] et deviennent indispensables sur des problèmes plus gros [14]. Le problème de convergence locale dont souffrent les algorithmes exploitant les gradients est souvent résolu par une hybridation d'algorithmes [14][27].



### 3.5.2 Calcul de Jacobien

Nous avons mis en oeuvre différentes techniques de dérivation de modèle. Historiquement [1][2] la dérivation des équations d'un modèle était réalisée par calcul symbolique de manière automatique par des outils tels que Maple ou Macsyma. Nous avons ensuite développé nos propres dérivateurs symboliques en Java [4]. Une autre technique a ensuite été mise en oeuvre pour dériver des équations mais aussi des algorithmes, basée sur la dérivation automatique de code. Un premier développement a été réalisé en Java [12], puis l'exploitation d'une bibliothèque logicielle existante pour le langage C (AdolC) [11][13] et enfin le développement d'une version en Java performante [26][15] afin de nous abstraire des contraintes techniques de passage C↔JAVA.

Malgré l'apport de la dérivation de code pour ce qui concerne la dérivation d'algorithmes « à la volée », les performances d'une dérivation symbolique « à la main » d'un algorithme de calcul sont bien meilleures. Ainsi, pour tous les algorithmes standards que nous utilisons dans CADES (*modélisation numérique par la méthode des moments magnétiques, intégration spatiale, résolution de système implicite, recherche d'extremum, intégration d'équations différentielles...*), nous avons définis un calcul de Jacobien exploitant au mieux des théorèmes de dérivation permettant d'en améliorer les performances.

### 3.5.3 Facette « *JacobianSolver* » d'ICAr

Parmi les facettes présentées dans la Figure 3-14, on retrouve 2 facettes particulières dédiées à l'obtention du Jacobien du modèle. La première « *JacobianSolver* » fournit le Jacobien complet du modèle. Pour les modèles rapides (quelques millisecondes) le calcul du Jacobien complet est souvent plus rapide qu'un Jacobien partiel. Par contre, pour des modèles un peu plus lourds (quelques secondes), embarquant des codes semi-analytique, il devient important d'économiser du temps en ajoutant une gestion sélective des calculs. C'est ainsi qu'a été spécifié la facette « *SelectiveJacobianSolver* ».

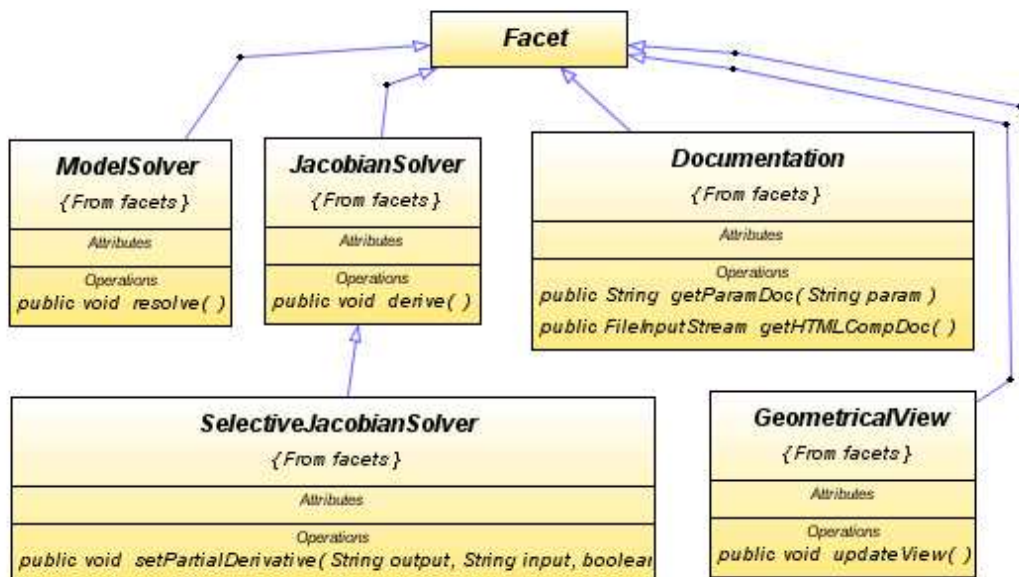


Figure 3-14 : Quelques facette du composant ICAr « statique » pour l'optimisation

### 3.5.4 Composition des dérivées

La composition doit bien sûr propager les valeurs du modèle mais également l'information de sensibilité. Deux méthodes sont possibles, la première par la composition

globale des Jacobiens de chacun des sous modèles, la seconde par propagation des différentielles. Cette dernière solution est plus facile à implémenter car elle ne nécessite pas de connaissance globale sur la composition [22]. Les deux techniques sont disponibles dans CADES et selon la technique de dérivation utilisée par chacun des composants, l'une ou l'autre approche est exploitée, avec également la possibilité d'hybrider les 2 approches [26].

### 3.5.5 Algorithmes d'optimisation

Le couplage entre le « composant model » et le « composant algorithme » est assuré par l'outil « ComponentOptimizer » de CADES. Une bibliothèque de composant d'optimisation y est disponible exploitant ou non l'information du Jacobien :

- Quasi-Newton (SQP-VF13)
- Branch&Bound (Direct-Gablonsky)
- Génétique (NSGAI)...

Afin d'assurer la mise en œuvre dynamique de stratégies d'optimisation, la composition d'algorithmes se réalise par l'assemblage de composants. Nous présentons dans [27], l'architecture de couplage dynamique, permettant de réaliser l'hybridation de nos différents composants d'optimisation (*OA dans la Figure 3-15*).

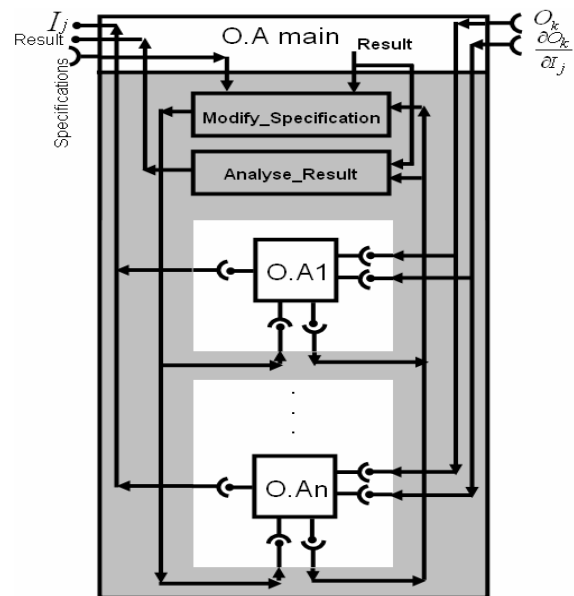


Figure 3-15 : Architecture de couplage entre un algorithme superviseur d'optimisation (OA main) et des algorithmes à composer (OAi)

## 3.6 La simulation dynamique

### 3.6.1 Contexte de recherche

La simulation dynamique de modèles constitue aujourd'hui une part importante de nouveaux travaux en particulier via les projets ANR Mocosymec pour la simulation dynamique en mécanique, ANR SimintheC pour la simulation thermique/électrique des bâtiments, et ANR Plumes pour la spécification des composants logiciels dédié au bâtiment. En particulier, nous avons spécifié des facettes pour la simulation dynamique d'ODE (équations différentielles ordinaires) et DAE (équations différentielles algébriques).

### 3.6.2 Modèles dynamiques ODE

Peuvent être embarqués dans un composant ICAR, les modèles ODE d'ordre N (en se ramenant à un système de N équations du premier ordre), explicites, linéaires ou non linéaires, associés à une équation vectorielle algébrique définissant les sorties du modèle en fonction du vecteur d'état :

$$\begin{cases} \dot{X}(t) = f(X(t), U(t), p, t) \\ Y(t) = g(X(t), U(t), p, t) \end{cases} \quad (3-2)$$

avec :

- X : vecteur d'états
- U : vecteur des sources
- p : les paramètres
- t : la variable temps.
- Y : vecteur des sorties



En particulier, les composants ICaR sont à même de définir des modèles dynamiques linéaires tels que :

$$\begin{aligned} \dot{X}(t) &= A \cdot X(t) + B \cdot U(t) \\ Y(t) &= C \cdot X(t) + D \cdot U(t) \end{aligned} \tag{3-3}$$

avec :

A, B, C, D : les matrices définissant le système dynamique linéaire.

Cette définition du système différentiel est classiquement adoptée dans les environnements de simulation tels que Simulink ou par les environnements traitant du langage Modelica (Dymola, AMESim, OpenModelica, ...).

Associé à ce type de modèle, nous avons défini des composants « solver » embarquant des algorithmes d'intégration de type Euler, Trapèze et Runge-Kutta (Figure 3-9).

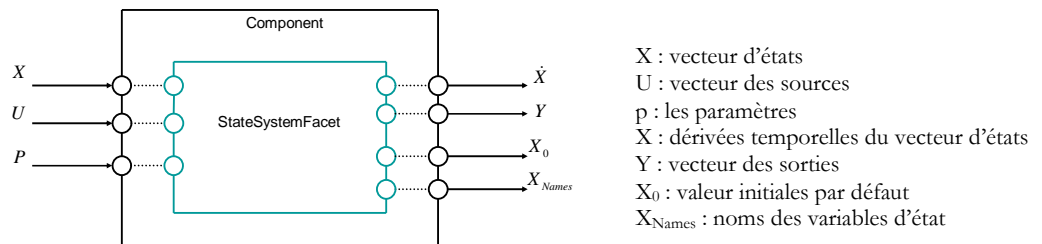


Figure 3-16 : Structure globale d'un composant pour la simulation d'ODE

De plus, associés aux équations d'états continues, des états discrets ou des événements peuvent être pris en compte dans nos modèles pour réaliser des simulations hybrides continues/discrètes avec gestion de pas variable. Ainsi, 3 facettes ont été définies (Figure 3-17) :

- ContinuousExplicitStateSystem : définissant une ODE classique.
- DiscretStateSystemAndEvents : pour la gestion d'états discrets et d'événements
- HybrideExplicitStateSystem : pour l'hybridation continu/discret

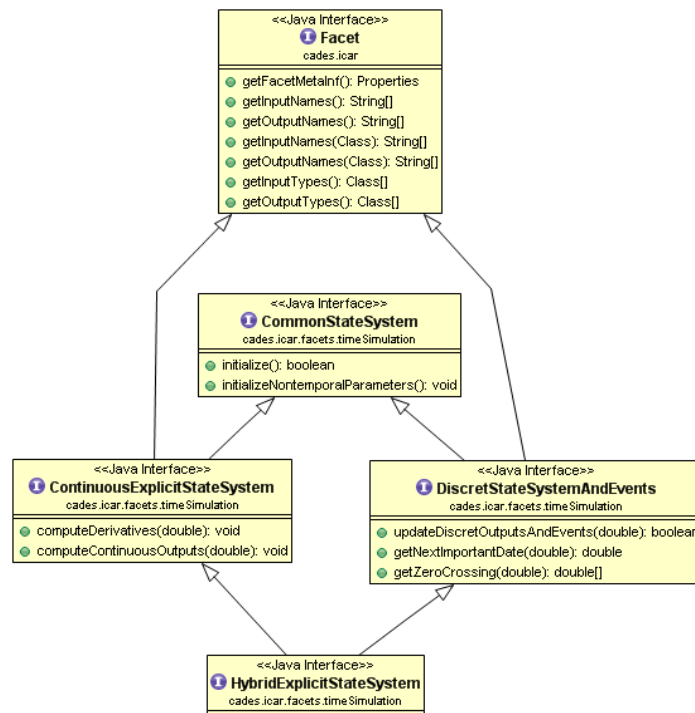


Figure 3-17 : Graphe UML des interfaces ICaR des composants pour la simulation (ICaR Framework)

### 3.6.3 Modèles dynamiques DAE

La norme est en cours d'extension avec la prise en compte de modèles dynamiques DAE Eq. (3-4) ou « ODE implicite avec contraintes », principalement utilisées par les simulateurs de circuits ou par le langage de description de modèles en VHDL-AMS dans les simulateurs tels que Simplorer ou Portunus.

$$\begin{cases} f(\dot{X}(t), X(t), U(t), p, t) = 0 \\ g(Y(t), X(t), U(t), p, t) = 0 \end{cases} \quad (3-4)$$

Les fonctions implicites inhérentes à une modélisation DAE sont généralement résolues par des procédures itératives telle que Newton-Raphson exploitant le Jacobien du modèle. Ainsi, tous les développements réalisés pour l'obtention d'un Jacobien dédié à l'optimisation peuvent être exploités pour résoudre un système DAE.

### 3.6.4 Génération de composants ICAR dynamiques

Grâce au calcul de Jacobien, il est possible de projeter un modèle DAE d'index 1 sur solver ODE en explicitant les dérivées du vecteur d'état par une procédure de Newton-Raphson. C'est ainsi qu'aujourd'hui nous disposons d'un outil que nous avons réalisé dans le cadre du projet ANR Plumes, transformant des ODE implicites (DAE d'index 1) en ODE explicites à l'aide du Jacobien calculé par notre dérivateur de code JAP [15]. Cet outil constitue, dans le framework CADES, un générateur de composants ICAR dynamiques (facettes ODE) à partir du langage standardisé MODELICA.

D'autres générateurs sont disponibles à partir d'outils de modélisation dédiés. C'est le cas en particulier du logiciel COMFIE, de modélisation d'enveloppe thermique du bâtiment, qui génère un composant ICAR dynamique autonome, embarquant le modèle de simulation qui peut ensuite être couplé à un solver d'ODE [25].

### 3.6.5 Simulation couplée, simulation système

Des plug'in d'ICAR dynamiques ont été réalisés pour les environnements de simulations tels que Dymola (Modelica) dans le cadre de la simulation énergétique du bâtiment [24], Smash (VHDL-AMS) dans le cadre de la simulation en mécatronique [23], ou encore Matlab/Simulink. Ces plug'in constituent un moyen efficace pour réaliser des simulations dynamiques couplées car les différents composants peuvent y être importés puis composés, et simulés de manière globale.

## **Conclusions**

L'environnement CADES nous permet de tester nos approches méthodologiques, il est avant tout le réceptacle de nos développements expérimentaux. Ensuite, CADES est un formidable vecteur de valorisation car il est utilisé par de nombreux acteurs (universitaires pour l'enseignement et la recherche, et industriels) pour ses fonctionnalités d'aide à la conception (modélisation, analyse, dimensionnement).

CADES et les composants logiciels ICAR, sont la mise en œuvre pratique des concepts informatiques présentés dans la partie précédente permettant de répondre aux enjeux de la complexité et de la dynamique en conception de systèmes. Malgré tout, ces enjeux restent d'actualité et sont loin d'être pleinement satisfaits. Nous allons voir, dans la partie suivante, que cette voie ouverte nous offre des perspectives encore plus importantes pour les environnements de CAO futurs.

## ***Bibliographie***

- [1] Laurent Gerbaud, « Gentiane : une Plate-Forme pour la Conception des Ensembles Machine-Convertisseur-Commande », HDR de l'INPG, soutenue le 11 juillet 2000.
- [2] Frédéric Wurtz, « Une nouvelle approche pour la conception sous contraintes de machines électriques » Thèse de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, 28 mai 1996.
- [3] Benoit DELINCHANT « Un environnement à base de composants intégrant le concepteur et ses outils pour de nouvelles méthodes de CAO » Thèse de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, soutenue le 10 juillet 2003.
- [4] Eric ATIENZA, « Méthodologie et outils pour le dimensionnement », Thèse de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, soutenue le 4 juillet 2003.
- [5] Loig ALLAIN, « Capitalisation et traitement des modèles pour la conception en génie électrique », Thèse de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, soutenue le 30 septembre 2003
- [6] David MAGOT, « Méthodes et outils logiciels d'aide au dimensionnement. application aux composants magnétiques et aux filtres passifs », Thèse de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, soutenue le 28 septembre 2004
- [7] Vincent FISCHER, « Composants logiciels pour le dimensionnement en génie électrique. application a la résolution d'équations différentielles », Thèse de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, soutenue le 12 octobre 2004.
- [8] Bertrand Du PELOUX de Saint Romain, « Modélisation des actionneurs électromagnétiques par réseaux de reluctances. Création d'un outil métier dédié au pre-dimensionnement par optimisation », Thèse de l'Université Joseph Fourier de Grenoble, soutenue le 9 octobre 2006.
- [9] Harijaona Lalao RAKOTOARISON, « Méthode et outil de génération automatique de modèle pour l'optimisation fortement contrainte des microsystemes magnétiques », Thèse de l'Université Joseph Fourier de Grenoble, soutenue le 29 Novembre 2007
- [10] Denis DURET, Laurent GERBAUD, Frederic WURTZ, Jean-Pierre KERADDEC, and Bruno COGITORE « Modeling of Passive Electronic Circuits with Sensitivity Analysis Dedicated to the Sizing by Optimization », KES 2007/ WIRN 2007, Part III, LNAI 4694, pp. 422–430, 2007.
- [11] Petre ENCIU, « Dérivation Automatique pour le calcul des sensibilités pour le dimensionnement en génie électrique », Thèse de l'Institut Polytechnique de Grenoble, soutenue le 16 juillet 2008.
- [12] Fischer, V.; Gerbaud, L.; Wurtz, F. « Using automatic code differentiation for optimization », IEEE Transactions on Magnetics, vol 41, Issue 5, May 2005.
- [13] P. Enciu, F. Wurtz, L. Gerbaud, B. Delinchant “Automatic differentiation for electromagnetic models used in optimization”, COMPEL, Vol 28, Issue: 5, pp 1313 - 1326, 2009
- [14] Bill Sessanga, « Optimisation de Gammes : Application à la Conception des Machines Synchrones à Concentration de Flux », thèse de l'Université de Grenoble, soutenue le 25 mars 2011.
- [15] Phuong PHAM-QUANG, « Modélisation magnéto-mécanique d'un nano commutateur. Optimisation sous contraintes de fiabilité par dérivation automatique des programmes en Java », thèse de l'Université de Grenoble, soutenue le 11/10/2011.

- [16] B. Delinchant, H.L. Rakotoarison, V. Ardon, O. Chadebec and O. Cugat, “Gradient based optimization of semi-numerical models with symbolic sensitivity: Application to a simple ferromagnetic MEMS switch device”, *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics (IJAEM)*, Volume 30, Number 3-4, pp.189-200, 2009
- [17] Ch. Pigot, B. Delinchant, G. Poulin and G. Reyne, “Optimization of a 3D micro-accelerometer based on diamagnetic levitation”, *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics (IJAEM)*, Volume 30, Number 3-4, pp. 179-188, 2009
- [18] Delinchant B., Gruosso G., Wurtz F. “Two Levels Modeling for the Optimization of Electromagnetic Actuators”, *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 45, issue 3, March 2009, pp. 1724-1727
- [19] H.L. Rakotoarison, H. Rostaing, B. Delinchant, O. Cugat, “Electromagnetic microsystems modelling to achieve very constraints design requirements”, *International Conference on Multidisciplinary Design Optimization and Applications*, 17-20 April 2007, Besançon , France
- [20] H. Chetouani, B. Delinchant, G. Reyne, “Efficient modeling approach for optimization of a system based on passive diamagnetic levitation as a platform for bio-medical applications”, *COMPEL*, Vol 26, Issue: 2, pp, 345 – 355, 2007
- [21] H. Rostaing, J. Stepanek, B. Delinchant, J. Delamare, O. Cugat « Conception, modélisation et prototypage d’un micro-relais bistable magnétique » *revue internationale de génie électrique (RIGE)*. 2005, vol 8 n\_5-6, pp. 703-724
- [22] B. Delinchant, F. Wurtz, E. Atienza, “Reducing sensitivity analysis time cost of compound model”, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 40 No. 2, mars 2004, pp 1216-1219, ISSN: 0018-9464
- [23] A. Rezgui, L. Gerbaud, B. Delinchant, “VHDL-AMS to support DAE-PDE coupling and multilevel modeling” *COMPUMAG’11*, Sydney, Australia, July 2011
- [24] S. Gaaloul, F. Verdière, B. Delinchant, F. Wurtz, “Interface Component Architecture for building simulation”, *Conférence IBPSA world 2011 - Novembre 2011- Sydney*
- [25] S. Gaaloul, B. Delinchant, F. Wurtz, S. Thiers, B. Peuportier “ Strong coupling of a building thermal model with a controlled electrical heater for an hybrid energy simulation ”, *ELECTRIMACS 2011*, 6-8th June 2011, Cergy-Pontoise, France
- [26] P. Pham-Quang, B. Delinchant, C. Ilie, E. Slusanschi, J.L. Coulomb, and B. du Peloux “Mixing Techniques to Compute Derivatives of semi-numerical models: Application to Magnetic Nano Switch Optimization”, *COMPUMAG’11*, Sydney, Australia, July 2011
- [27] Hieu Nguyen-Huu, F. Wurtz, N. Retière, B. Delinchant, “Composition of Optimization Algorithms by using Software Components for Optimization of Electromagnetic Devices”, *COMPUMAG 2007*, June 24-28, 2007, Aachen, Germany
- [28] B. Delinchant “Interval Arithmetic for the Design of Electrical Engineering Systems”, *OIPE 2006 –September 13th – 15th 2006, Sorrento (Italy)*
- [29] V. Fischer, B. Delinchant, F. Wurtz, and L. Gerbaud “Using Software Components for Multi-disciplinary Optimization”, *CEFC’04*, Séoul, Corée, 6-9 juin 2004



---

<b>4 Recherches en cours et futurs</b> .....	71
4.1 Synergie avec Vesta-Systems .....	71
4.2 Vers les prochaines générations de méthodes et d'outils .....	72
4.2.1 Vers des formalismes multi-métiers .....	72
4.2.2 Vers l'optimisation robuste et fiable .....	73
4.2.3 Vers l'optimisation dynamique .....	73
4.2.4 Vers la commande optimale de systèmes .....	73
4.2.5 Une synergie forte.....	74
4.2.6 Vers les réseaux collaboratifs .....	74

## 4 Recherches en cours et futures

Outre les nouvelles perspectives en terme d'ergonomie et de support apportées par la société Vesta qui valorise CADES, des travaux de recherche actuels orientent les futurs développements de CADES. A l'origine un framework pour l'optimisation (statique) de modèle en génie électrique, CADES s'oriente progressivement vers une couverture applicative plus large, en intégrant en particulier les problématiques des systèmes multiphysiques (bâtiment). Dans ce cadre applicatif, de nouveaux besoins émergent, comme celui de disposer de composants métiers (composant MUSE), de travailler sur le contrôle optimal (optimisation dynamique) et de travailler en réseau collaboratif.

### 4.1 Synergie avec Vesta-Systems

Le travail en partenariat avec Vest-System a commencé sur de nombreux projets et selon plusieurs axes. Le premier axe consiste à exploiter directement CADES sur divers applicatifs et ainsi bénéficier de retours d'expérience de plus en plus nombreux nous permettant d'affiner notre perception du besoin. Le second vise à proposer des projets de recherche en collaboration avec Vesta-Systems pour garantir les développements et la valorisation de nos travaux.

L'organisation de cette collaboration doit être menée de telle façon que le produit issu de la recherche poursuive son évolution. Elle doit se faire en terme d'ergonomie ou de fonctionnalités facilitant le quotidien de l'utilisateur, mais également en terme de rupture vis à vis de techniques classiques que notre travail de recherche vise à apporter. En particulier, grâce à une architecture modulaire de la plateforme CADES, ainsi qu'aux techniques de développement collaboratif que nous avons mis en place (forge SVN<sup>1</sup>), nous pouvons croire que nos travaux de recherche pourront être intégrés de manière parallèle aux développements de Vesta-Systems.

---

<sup>1</sup> site internet de développement collaboratif offrant une solution de versionnement concurrent des codes informatiques

## 4.2 Vers les prochaines générations de méthodes et d'outils

De nouveaux besoins fonctionnels et de nouveaux verrous à lever apparaissent. En particulier, dans le cadre applicatif des systèmes tels que les bâtiments, émergent de nouveaux besoins comme celui de:

- disposer de formalismes ad hoc (composant MUSE et langages systèmes),
- gérer des modèles et données incertains (optimisation robuste/fiable),
- travailler sur le contrôle optimal (optimisation dynamique)
- travailler en réseau collaboratif. (calcul et partage de modèles sur Internet)

### 4.2.1 Vers des formalismes multi-métiers

Dans le projet ANR PLUMES « Plateforme Logicielle Unifiée de Modélisation pour l'Efficacité énergétique du bâtiment et de ses Systèmes », regroupant les partenaires CEA LIST, CEA INES, CSTB, G-SCOP, EDF, l'objectif est de définir une architecture logicielle autour du concept de composant logiciel métier nommé MUSE. Je suis en charge des spécifications de ce composant logiciel ainsi que des outils permettant la génération automatique de ces composants. Le composant MUSE s'appuiera sur notre expérience avec les composants ICAR, mais adressera le monde de la conception de bâtiments en visant 3 métiers plus spécifiques : la simulation dynamique, le dimensionnement optimal, et le contrôle/commande. Le challenge du composant MUSE sera d'adresser ces trois domaines en même temps et de changer de « vue » selon l'usage qui en sera fait. Pour cela, nous travaillons sur différents formalismes de représentations d'un même artefact (plusieurs modèles) et nous les mettons en œuvre pour différents besoins (dimensionnement, simulation fine, control embarqué).

C'est dans ce cadre que s'inscrivent les thèses de Sana GAALOUL, Abir REZGUI et de Hoang Anh DANG, en lien également avec les projets ANR Simintech, ANR Mocosymec et projet OSEO HOMES avec Schneider Electric.

- Sana GAALOUL travaille sur l'interopérabilité en simulation dynamique de modèles issus de différents métiers de la modélisation (thermique, électrique, usage), en proposant des formalismes de modélisation ad hoc permettant l'interconnexion automatisée des ces modèles de différentes nature. Le formalisme de modélisation MODELICA ainsi que les composants logiciels traitant d'ODE sont plus particulièrement étudiés.
- Abir REZGUI travaille sur la modélisation de systèmes mécatroniques (magnétisme, électronique, mécanique) dans le cadre du cycle en V de conception (modèle fonctionnel, de simulation, de dimensionnement), et en particulier sur les formalismes permettant la modélisation à tous les niveaux du cycle (PVF<sup>2</sup>). Le formalisme de modélisation VHDL-AMS ainsi que les composants logiciels traitant de DAE sont plus particulièrement étudiés.
- Hoang Anh DANG développe des modèles de systèmes du bâtiment (VMC<sup>3</sup>, PAC<sup>4</sup>, Batterie, ...) pour les métiers de la simulation et de l'optimisation et cherche à mettre en évidence des corrélations ou des moyens plus ou moins automatisés pour passer d'une représentation à l'un autre.

---

<sup>2</sup> Prototypage Virtuel Fonctionnel [9]

<sup>3</sup> VMC : ventilation mécanique contrôlée

<sup>4</sup> PAC : pompe à chaleur

#### 4.2.2 Vers l'optimisation robuste et fiable

Dans le projet ANR FIABILITE, regroupant les partenaires TREFLE, ARMINES (CEP), CEA-INES, EDF, GSCOP, LOCIE, LPBS, l'objectif est de traiter les incertitudes en simulation. Pour ce faire, différentes techniques d'analyse de sensibilité existent et en particulier deux approches que nous souhaitons explorer, les approches ensemblistes (arithmétique d'intervalle [12][13][14]) et les approches locales (propagation du gradient [15][16][17]). C'est dans ce cadre que j'ai l'honneur de diriger ma première thèse, avec le soutien d'Olivier Adrot, un chercheur du laboratoire G-Scop et Mathilde Grandjacques comme doctorante de formation mathématiques appliquées.

Ces calculs de sensibilité pourront ensuite être exploités dans les phases d'optimisation pour assurer des critères de robustesse et de fiabilité.

#### 4.2.3 Vers l'optimisation dynamique

Qu'il s'agisse de dimensionnement ou de control optimal, il n'est plus suffisant de considérer l'optimisation de modèles statiques. Dans le cadre de la simulation virtuelle ou du calcul en temps réel, il doit être possible d'appliquer des algorithmes d'optimisation sur ces modèles. Deux types de contraintes sont possibles, les contraintes de chemin définissant des profils de trajectoire, et des contraintes à temps final. Le premier type peut se traiter par une discrétisation temporelle, ce qui nous permet d'appliquer des contraintes sur chaque valeur [6][7] mais conduisant à un système de taille importante, avec en sus des problèmes en terme de corrélation implicite entre les variables de design. La deuxième type exploite un post processing d'optimisation, pour calculer par exemple des grandeurs en régime permanent, des valeurs max, moyenne ou efficace, ou bien un temps de réponse. Selon la nature de la simulation (équations différentielles ou temps discret), il est plus ou moins délicat d'appliquer les techniques standards de dérivation pour utiliser un algorithme à gradient [8][2]. Les méthodes d'optimisation que nous utilisons dans CADES doivent donc être adaptées à ce nouveau terrain mathématique. Par exemple, dans le cadre du contrôle optimal, il est souvent préférable de linéariser les modèles et d'appliquer des algorithmes standards de programmation linéaire entière mixte (MILP<sup>5</sup>) [6]. D'autres méthodes sont également utilisées (*Méthode de Potkonjak et Vukobratović* pour ou *Méthode de Dequidt*) pour inverser les modèles dynamiques [10][11]. Le principe du minimum de Pontryagin est également très employé en contrôle optimal, il permet de trouver la commande permettant d'amener un système dynamique d'un état à un autre, en présence de contraintes.

#### 4.2.4 Vers la commande optimale de systèmes

Nous pouvons imaginer les futurs équipements (du secteur industriel ou tertiaire) disposant de leur propre modèle de prévision, dialoguant avec un superviseur permettant de trouver la commande globale optimale. Un nouvel équipement installé ne nécessiterait alors pas de modification du système global mais il s'adapterait automatiquement grâce à des normes d'échange de modèles comme la norme ICAr. En effet, nos composants ICAr sont compatibles avec la norme OSGi<sup>6</sup> qui est une norme de composant/service pour les équipements communicants, avec découverte dynamique des services [18][19].

Ces configurations peuvent d'ores et déjà être simulées pour identifier les gains d'un tel environnement grâce à la simulation, ce que nous faisons avec Schneider Electric dans le projet HOMES pour lequel An Pham Duy a développé des modèles de consommation d'équipements

---

<sup>5</sup> MILP : mixed integer linear programming

<sup>6</sup> OSGi : [www.osgi.org](http://www.osgi.org)



électriques (lave linge, réfrigérateur, ...) dont on a de grandes difficultés à prévoir les usages. De la même manière, dans la thèse de Hoang Anh DANG, nous développons des modèles de batterie électrique pour intégrer du stockage, des modèles de VMC et PAC qui sont des éléments de régulation énergétique très forts [22].

D'une manière plus concrète, l'habitat intelligent est une réalité commerciale aujourd'hui, en témoigne la récente solution<sup>7</sup> proposée par Bouygues Telecom (communication, Internet) et Ijenko (plateforme de gestion énergétique, domotique) de "service de pilotage, de maîtrise de l'énergie et de protection du foyer". Cette solution exploite de manière complémentaire les boxes internet qui fleurissent dans nos foyers pour y inclure des services de gestion de l'énergie communicants. Ce secteur passera de 1 million d'utilisateurs dans le monde en 2011 à 63 millions en 2020<sup>8</sup>.

Une des difficultés de la maîtrise de l'énergie, c'est l'anticipation, afin de calculer une commande optimale. Or cette anticipation passe par les modèles des équipements et de leur environnement (*usages, conditions météorologiques, etc.*). Si les systèmes de gestion sont équipés de moyens de communication, ils peuvent, au gré de l'évolution des équipements en présence, interroger des bases de données de composants modèles comme le fait un système d'exploitation en téléchargeant le driver d'un équipement « plug'n'play » que l'on connecte à un ordinateur.

#### 4.2.5 Une synergie forte

Nous avons fait réaliser dans notre laboratoire la plateforme MHI « Monitoring et Habitat Intelligent » dans le cadre de la plateforme PREDIS d'enseignement-recherche. Cette plateforme est instrumentée pour nous aider à développer et valider nos modèles ainsi que pour tester des stratégies de contrôle commande in situ.

De manière complémentaire à CADES, la société Vesta-Systems valorise également une solution de contrôle commande optimal développée dans le cadre des travaux de recherche de Stéphane PLOIX [20][21] du laboratoire G-Scop avec qui je travaille en recherche et en enseignement sur la plateforme MHI.

Un certain nombre de mes projets associent Vesta-Systems et G-Scop, en particulier grâce à Frédéric WURTZ, qui est à l'origine de nombreuses actions de recherche dans lesquelles je suis impliqué. Cette synergie (*plateforme, laboratoires complémentaires, société de valorisation*) est un atout majeur pour assurer la pertinence de nos recherches, faire évoluer nos solutions et les valoriser.

La plateforme MHI est également l'occasion pour moi de faire un pont entre mes travaux de recherche et l'enseignement que j'effectue à l'IUT de Génie Electrique et Informatique Industrielle, concernant plus particulièrement les systèmes automatisés et leurs réseaux de communication.

#### 4.2.6 Vers les réseaux collaboratifs

Qu'il s'agisse de commande optimale ou de conception de systèmes, nous pouvons considérer que l'avenir passera par les réseaux de communication. En effet, en conception par exemple, il est de plus en plus fréquent d'avoir à faire à des systèmes complexes faisant intervenir différents acteurs multidisciplinaires. Deux voies d'interaction peuvent alors être investiguées. La première consiste en des échanges « collaboratifs » de modèles. Ces derniers étant implémentés

---

<sup>7</sup> Article du 25 juillet 2011 sur *GreenUniverse* « Les box énergie s'allient aux box Internet : la bataille du smart home s'ouvre »

<sup>8</sup> Article du 8 juin 2011 sur *PikeResearch* : "Home Energy Management Users to Reach 63 Million by 2020"

dans des composants logiciels, ils sont facilement interchangeables via des plateformes collaboratives telles que DIMOCODE [1][3][4]. De plus, si l'outil associé au modèle est disponible en tant que « service web » et accessible par un simple navigateur, un utilisateur pourra récupérer le « source » du modèle de la forge (Dimocode), l'adapter, et régénérer le composant logiciel correspondant. Cette phase de réappropriation est très délicate et les informations associées au composant de calcul sont cruciales (hypothèses, domaine de validité, pour quels besoins, ...).

La deuxième voie correspond à celle du cloud-computing. Nous avons montré dans le cadre du projet ANR SimintheC en partenariat avec la société Petals-Link<sup>9</sup>, que nos composants ICAr (compatibles WEB-Services) permettaient de déposer des modèles sur des serveurs et de les exécuter à distance, de la même manière qu'une utilisation locale. Cela signifie qu'un modèle peut être créé par une société de sous-traitance, mis en ligne pour ses clients, ceux-ci étant capables de les interroger à distance et de lancer un calcul ou une optimisation. Ce calcul pouvant être coûteux, une machine ou un cluster de machines peut alors être utilisé de manière transparente. C'est également un moyen pour acheter des droits d'utilisation à des logiciels de modélisation coûteux sans souffrir de l'achat de licences. Ces nouvelles relations clients/fournisseurs peuvent modifier nos façons de travailler et envisager des collaborations plus « couplées ».

## ***Bibliographie***

- [1] Frédéric WURTZ, *Conceptions de la conception pour le génie électrique: de l'approche « Objets –Savoirs – Méthodes – Outils » à l'approche « Systèmes – Connaissances – Compétences - Organisations », HDR soutenue à l'INPG le 03/04/2008*
- [2] P. Enciu, L. Gerbaud, F. Wurtz. "Automatic Differentiation Applied for Optimization of Dynamical Systems", COMPUMAG 09, Brazil (2009)
- [3] B. Delinchant, V. Riboulet, L. Gerbaud, P. Marin, F. Noël, F. Wurtz "Cooperative Design among Mechanical and Electrical Engineers over the Internet: some Implications for Tools supporting Human Communication Between Various Professional Cultures", IEEE Transactions on Professional Communication. Special Issue: International Communication, Technology, and Culture. Vol. 45, No. 4, Dec. 02, pp. 231-249, ISSN 0361-1434.
- [4] B. Delinchant, J. Stepanek, L. Rakotoarison, J. Delamare, O. Cugat, F. Wurtz, "Capitalizing on computation tools to improve design and knowledge sharing of magnet based devices", HPM'04, Annecy (France) 29 août.-2 sept. 2004
- [5] A. Rezgui, L. Gerbaud, B. Delinchant, "VHDL-AMS to support DAE-PDE coupling and multilevel modeling" COMPUMAG'11, Sydney, Australia, July 2011
- [6] Ghaith Warkozek, Stéphane Ploix, Frédéric Wurtz, Mireille Jacomino, Benoit Delinchant « Stability study for optimal energy management in multisources building », OIPE 2010, Sofia, Bulgaria, September 14 – 18 2010
- [7] Guillaume Foggia, Benoît Delinchant, Nouredine Hadjsaid, Frédéric Wurtz "Optimization by stochastic programming for the aggregation of a commercial virtual power plant", OIPE 2010, Sofia, Bulgaria, September 14 – 18 2010
- [8] Delinchant B., Gerbaud L., Wurtz F., «Parallelisation of quasi-static simulations of moving system: Application to the optimization of magnetic micro switch», NUMELEC 2008, Liège Belgique, Pages 84-85, 08-11 dec2008

---

<sup>9</sup> [www.petalink.com](http://www.petalink.com)

- [9] Y. Hervé, P.Desgreys, “Functional virtual prototyping design flow and VHDL-AMS”, FDL'06, Septembre 2006
- [10] Audrey Jardin “Contribution à une méthodologie de dimensionnement des systèmes mécatroniques : analyse structurelle et couplage à l’optimisation dynamique”, thèse de l’INSA Lyon en EEA, Spécialité : Énergie et Systèmes, soutenue le 15 janvier 2010.
- [11] Wilfrid Marquis-Favre, « Contribution à la conception et la modélisation des systèmes mécatroniques (et de leurs sous-systèmes mécaniques) », HDR, INSA Lyon, 25/01/2007.
- [12] Adrot O., Flaus J-M., Fault detection based on uncertain switching models with bounded parameters, Safeprocess2009, 7th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes, Barcelona, 30th June – 3rd July, 2009
- [13] Adrot O., Flaus J-M., Guaranteed fault detection based on interval Constraint Satisfaction Problem, Conference on Control and Fault-Tolerant Systems, Systol’10, pp 708-713, Nice, France, October 6-8, 2010
- [14] B. Delinchant “Interval Arithmetic for the Design of Electrical Engineering Systems”, OIPE 2006 –September 13th – 15th 2006, Sorrento (Italy)
- [15] P. Pham-Quang, B. Delinchant, C. Ilie, E. Slusanschi, J.L. Coulomb, B. du Peloux “Mixing Techniques to Compute Derivatives of semi-numerical models: Application to Magnetic Nano Switch Optimization”, accepted in COMPUMAG 2011, 12-15 July 2011, Sydney, Australia.
- [16] P. Enciu, F. Wurtz, L. Gerbaud, B. Delinchant “Automatic differentiation for electromagnetic models used in optimization”, COMPEL: The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering; Vol 28, Issue: 5, pp 1313 - 1326, 2009
- [17] B. Delinchant, H.L. Rakotoarison, V. Ardon, O. Chadebec and O. Cugat, “Gradient based optimization of semi-numerical models with symbolic sensitivity: Application to a simple ferromagnetic MEMS switch device”, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics (IJAEM), Volume 30, Number 3-4, pp.189-200, 2009
- [18] Didier DONSEZ « Objets, composants et services : intégration de propriétés non fonctionnelles », HDR Informatique, 11/12/2006
- [19] Clément Escoffier « iPOJO : Un modèle à composant à service flexible pour les systèmes dynamiques », thèse Informatique de l’Université Joseph Fourier, soutenue le 03/12/2008
- [20] L. D. Ha, S. Ploix, M. Jacomino, and F. Wurtz, "Energy Management", chapter A mixed integer programming formulation of the home energy management problem, INTECH, 2010.L.
- [21] D. Ha, S. Ploix, E. Zamai, and M. Jacomino, "Realtimes dynamic optimization for demand-side load management", International Journal of Management Science and Engineering Management, 3(4), November 2008.
- [22] H. A. Dang, B. Delinchant, S. Gaaloul, F. Wurtz “Electrical performance optimization of an HVAC dual flow”, ELECTRIMACS 2011, 6-8th June 2011, Cergy-Pontoise, France

5	ANNEXES .....	77
5.1	Résumé de curriculum vitae .....	77
5.2	Résumé des encadrements de travaux de recherche.....	78
5.3	Encadrements : modélisation en électromagnétisme et applicatifs microsystèmes .....	78
5.3.1	Conception de composants électromagnétiques (4 thèses soutenues) .....	78
5.3.2	Valorisation et extension de l'approche (2 masters, 1 thèse) .....	85
5.3.3	Hybridation avec le calcul numérique (1 master, 1 thèse) .....	86
5.4	Encadrements : simulation dynamique de systèmes et applicatifs bâtiment.....	87
5.4.1	Couplages de modèles en électromagnétisme (2 thèses) .....	87
5.4.2	Multi-physique appliquée au bâtiment (2 masters, 3 thèses) .....	88
5.4.3	Développements informatiques .....	89
5.5	Projets en cours, partenaires et financements associés .....	90
5.6	Fonctions d'intérêts collectifs .....	90
5.7	Publications .....	91
5.8	Enseignements .....	96
5.8.1	Matières enseignées .....	96
5.8.2	Volumes horaires .....	96
5.8.3	Responsabilités pédagogiques et administratives.....	96

## 5 ANNEXES

### 5.1 Résumé de curriculum vitae

Né en 1976, j'ai fait mes études secondaires en Lorraine, mes classes préparatoires à Nancy et j'ai intégré l'école nationale d'ingénieur électriciens de Grenoble en 1997. Spécialisé en « modélisation, conception, simulation » j'obtiens le diplôme d'ingénieur en génie électrique de l'INPG, mention bien, puis le diplôme d'études approfondies (DEA en génie électrique) mention très bien, en 2000.

J'ai ensuite obtenu ma thèse de l'INPG, spécialité génie électrique, le 10/07/2003, intitulée « *Un Environnement à base de Composants, Intégrant le Concepteur et ses Outils, pour de Nouvelles Méthodes de CAO* ». Le jury était constitué de :

Yves Perriard	PR	Rapporteur	Directeur du LAI – EPFL, Lausanne, Suisse
Laurent Nicolas	DR	Rapporteur	Directeur du CEGELY, Lyon
Gilbert Reyne	DR	Président	DR CNRS, micro-systèmes, LEG, Grenoble
Jean-François Boujut	MCf	Examinateur	Directeur IPI, MCf en conception mécanique.
Frédéric Wurtz	CR	Encadrant	CR CNRS, LEG, Grenoble
Jean Bigeon	DR	Directeur	DR. CNRS, LEG, Grenoble

J'ai obtenu, après ma thèse et mon monitorat, un poste d'ATER en temps plein à l'IREENA de Saint-Nazaire et au département de génie électrique de Polytech'Nantes.

Depuis 2004, je suis maître de conférence au G2ELab, attaché à l'IUT de génie électrique et informatique industrielle de l'Université Joseph Fourier à Grenoble.

## 5.2 Résumé des encadrements de travaux de recherche

Mes encadrements ou co-encadrements de travaux de recherche débutent en 2004, dès mon recrutement, sur la thématique méthodologique de conception de microsystèmes. Je décline dans le tableau suivant, la liste des thèses que j'ai co-encadrées en indiquant s'il s'agit d'une thèse dont le thème est plutôt méthodologique ou applicatif et le domaine applicatif correspondant (MEMS ou bâtiment).

2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	Méthode Applicatif	Comp. EM Bâtiment	Directeur	Financement	
Hichem CHETOUANI							CRCT					✓	✓	Gilbert REYNE	Ministère
Lalao RAKOTOARISON												✓	✓	Orphée CUGAT	CNRS PED
Abdelhadi BESRI												✓	✓	Jean-Pierre KERADEC	CNRS Ent.
Phuong PHAM QUANG												✓	✓	Jean-Louis COULOMB	CIFRE
Lounes MOKHTARI												✓	✓	Jean-Louis COULOMB	EEATS fléchée
Christophe RUBECK												✓	✓	Jean-Paul YONNET	EEATS fléchée
Abir REZGUI												✓	✓	Laurent GERBAUD	ANR
Sana GAALOUL												✓	✓	Frédéric WURTZ	ANR
Hoang Anh DANG												✓	✓	Frédéric WURTZ	Ministère
Douglas MARTINS ARAUJO												✓	✓	Jean-Louis COULOMB	CIFRE
Mathilde GRANDJACQUES												✓	✓	Benoit DELINCHANT	ANR

Figure 5-1 : liste des thèses encadrées et thématiques associées.

Dans les deux parties suivantes sont décrits les tenants et aboutissants de chacun de ces travaux. Ils sont décomposés de manière thématique mais respectent également une certaine chronologie.

## 5.3 Encadrements : modélisation en électromagnétisme et applicatifs microsystèmes

Le domaine applicatif principal depuis ma prise de poste en 2004 a été celui des microsystèmes électromagnétiques.

### 5.3.1 Conception de composants électromagnétiques (4 thèses soutenues)

- **2004-07 : Hichem CHETOUANI**, a soutenue sa thèse intitulée « Microsystemes et micromanipulation à lévitation diamagnétique : conception, réalisation et application à la micro fluidique digitale et à la biologie », le 28/11/2007, thèse préparée sous la direction de **Gibert REYNE**, financé par une bourse ministérielle.

**Jury** composé des encadrants et de :

- Anne-Marie GUÉ, LAAS, Président
- Hannes BLEULER, EPFL, Rapporteur
- Vincent SENEZ, IEMN, Rapporteur
- Vincent HAGUET, CEA/Biopuces, Examineur
- Christian JEANDEY, CEA/LETI, Invité
- Marie FRÉNÉA ROBIN, Ampère, Invité

Hichem a reçu pour ses travaux le **prix de thèse** INP Grenoble, et, en partenariat avec le CEA, a donné lieu à un **dépôt de brevet** « Structure à aimant(s) permanent(s) pour le piégeage

et/ou le guidage et/ou la séparation et/ou le filtrage de particules » n°WO2007125129 (A1). Hichem est, à cette date, pilote de compétence « fonction mesure » chez Hager à Obernai pour les produits de protection différentielle.

Dans cette thèse à caractère très novateur, ma contribution s’est essentiellement portée sur la compréhension du processus de conception innovante en vue de son support informatisé, sur la modélisation des phénomènes magnétiques et particulièrement diamagnétiques, ainsi que sur l’optimisation sous contraintes. Les modèles issus de ces travaux ont été capitalisés dans l’outil développé par la thèse de Lalao Harijaona RAKOTOARISON.

Les figures suivantes illustrent quelques applications de ces travaux de thèse.

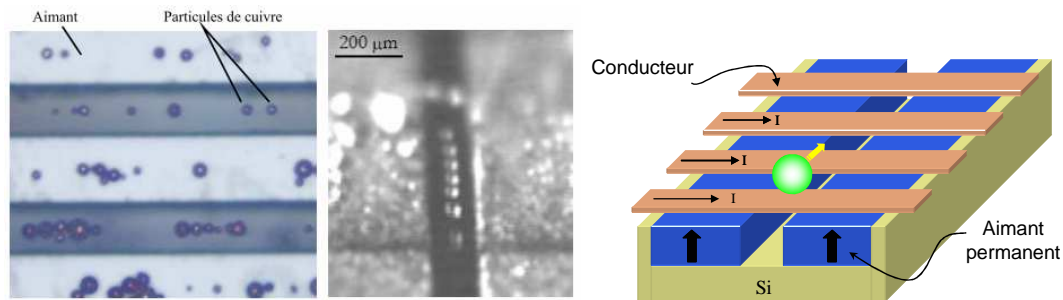


Figure 5-2 : Levitation de particules diamagnétique, et principe de dimagnétophorèse.

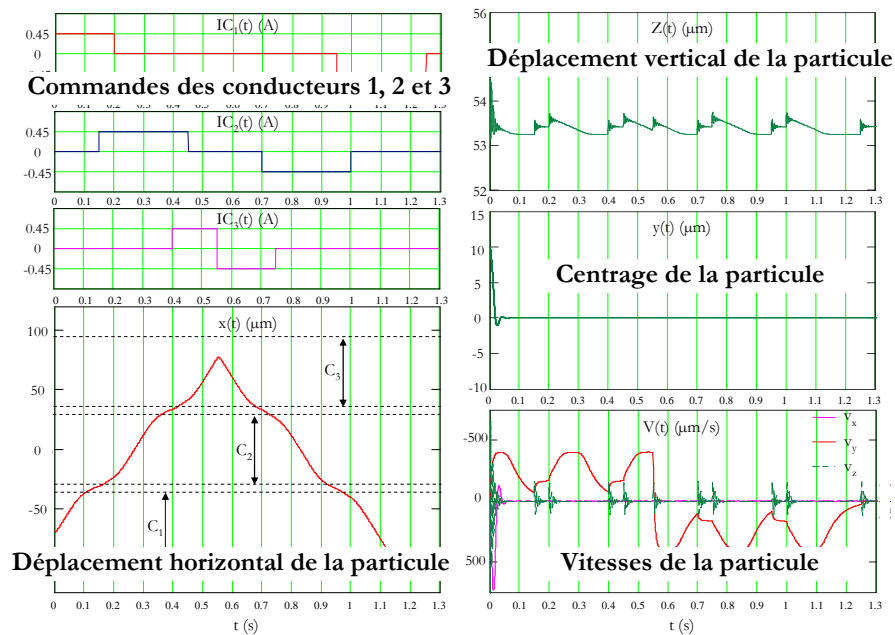


Figure 5-3 : Simulation de déplacement d’une particule en lévitation par dimagnétophorèse.

Publications associées :

- H. Chetouani, **B. Delinchant**, G. Reyne, “Efficient modeling approach for optimization of a system based on passive diamagnetic levitation as a platform for bio-medical applications”, **COMPEL**, Vol 26, Issue: 2, pp, 345 – 355, 2007
- H. Chetouani, H. Rostaing, F. Wurtz, G. Reyne, **B. Delinchant** “A novel sizing environment (DSP-1) dealing with semi-numerical models applied to the optimization of a bi-stable out-of-plane magnetic micro-switch”, **IEEE Transactions on Magnetics**, Vol. 42, Issue 4, april 2006, pp 1231- 1234, ISSN: 0018-9464
- H. Chetouani, L.H. Rakotoarison, **B. Delinchant**, G. Gruosso, A.Canova, M. Repetto “Graphite Levitation over four Magnets: Benchmarking Micrometer Dia-Magnetic Modeling”, **COMPUMAG 2007**, 16th International Conference on the Computation of Electromagnetic Fields, June 24-28, 2007, Aachen, Germany

- Chetouani, H. Haguet, V. Jeandey, C. Pigot, C. Walther, A. Dempsey, N. M. Chatelain, F. **Delinchant, B.** Reyne, G. "Diamagnetic Levitation of Beads and Cells Above Permanent Magnets", Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conference, **TRANSDUCERS 2007**. pp: 715-718, Lyon, France, 10-14 June 2007

- **2004-07 : Lalao Harijaona RAKOTOARISON** a soutenu sa thèse intitulée « Méthode et outil de génération automatique de modèle pour l'optimisation fortement contrainte des microsystèmes magnétiques », le 29/11/2007, thèse préparée sous la direction de **Orphée CUGAT** (Cugat 50%, Delinchant 50%), financée par une bourse CNRS pays en développement.

**Jury** composé des encadrants et de :

- Daniel ESTEVE, LAAS, Président
- Yvan LEFEVRE, Laplace, Rapporteur
- Philippe LUTZ, Femto-ST, Rapporteur
- Jean-Louis COULOMB, G2ELab, Examineur
- Vincent LECONTE, Schneider, Examineur

Le logiciel « MacMMEMS » qui a été développé durant ces travaux a été **déposé à l'APP** (agence de la protection des programmes, n°IDDN.FR.001.270012.000.S.P.2008.000.00000, titulaire : CNRS - UJF Floralis). Lalao est, à cette date, ingénieur développement en électromagnétisme (capteurs et actionneurs) chez Electricfil Automotive, Miribel France.

Mon implication dans cette thèse a été forte puisque Lalao a été très rapidement orienté vers la modélisation et le développement d'un logiciel dédié à la conception de MEMS. Ce logiciel, basé sur le couplage de briques élémentaires magnétiques, se positionne comme l'état de l'art en terme de modélisation analytique des interactions magnétiques. Les modèles sont issus d'une analyse des différentes méthodes de modélisations utilisées auparavant (moment dipolaire, charges équivalente, courant équivalent, ...). L'outil les capitalise et les met en musique par la génération automatique des interactions entre composants. Il génère un ensemble d'équations résultant des calculs de champ, des transformations géométriques, et des calculs de couples et de forces. Ces équations sont ensuite exploitées dans l'environnement CADES, que nous détaillerons dans ce mémoire, afin de résoudre des problèmes d'optimisation.

Les figures suivantes illustrent le principe et quelques applications du logiciel développé dans cette thèse.

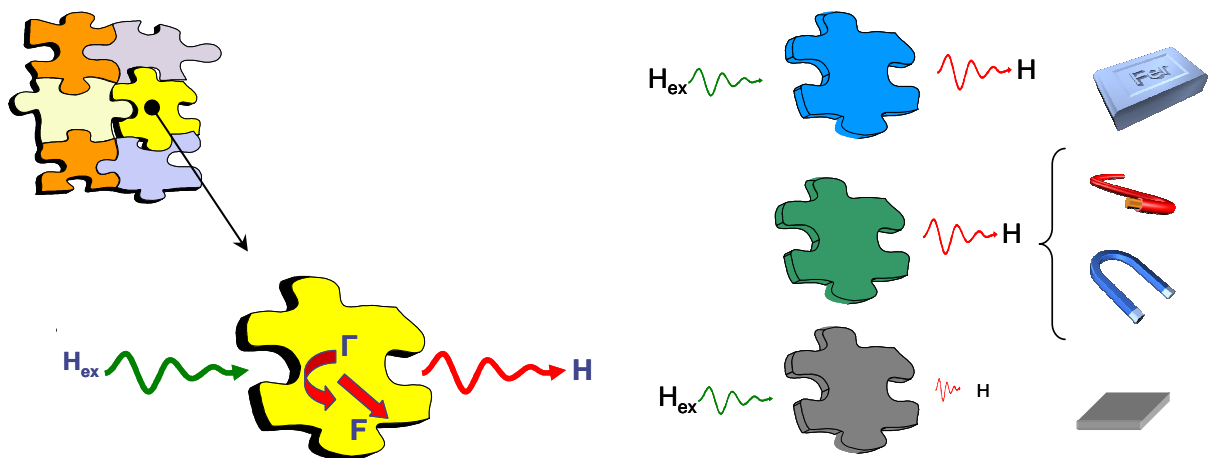


Figure 5-4 : Principe des composants à interaction magnétique.  
Application aux ferromagnétiques, aimants et conducteurs, et diamagnétiques et paramagnétiques.



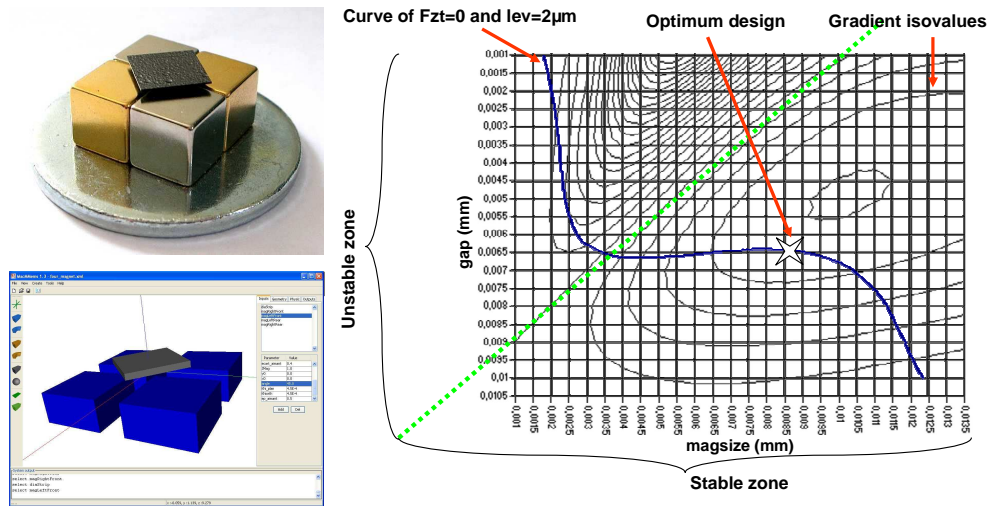


Figure 5-5 : Modélisation et optimisation de stabilité d'un système de lévitation

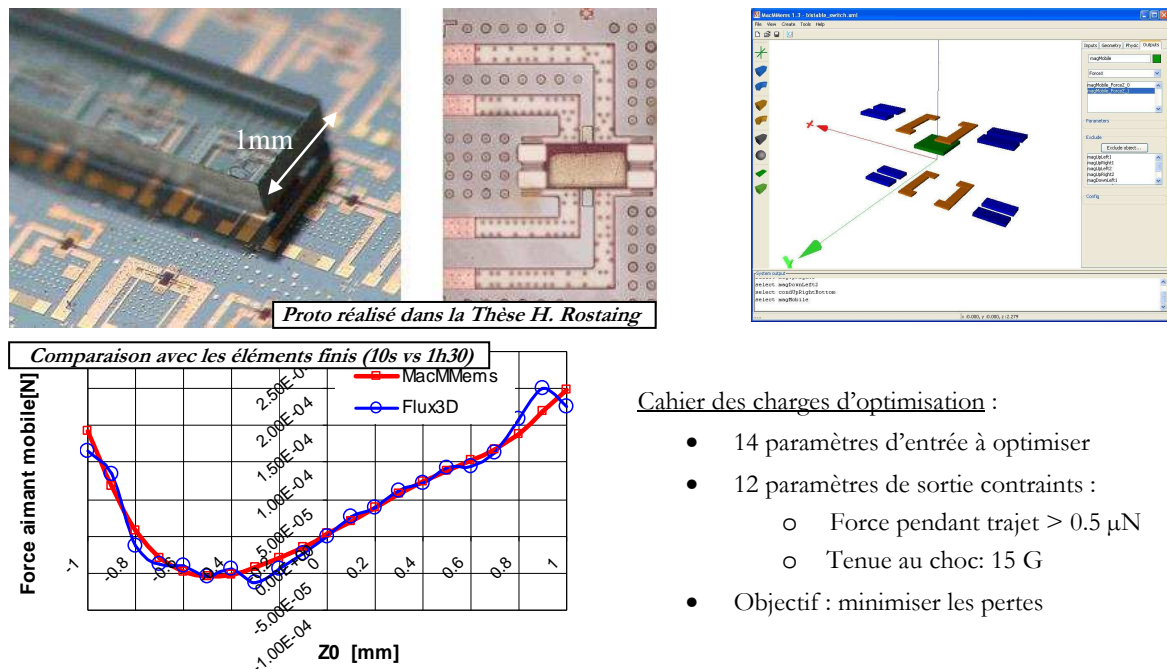


Figure 5-6 : Conception d'un micro contacteur magnétique, dimensionnement par optimisation.

Cahier des charges d'optimisation :

- 14 paramètres d'entrée à optimiser
- 12 paramètres de sortie contraints :
  - Force pendant trajet > 0.5  $\mu\text{N}$
  - Tenue au choc: 15 G
- Objectif : minimiser les pertes

Publications associées :

- H. L. Rakotoarison, J. P. Yonnet, **B. Delinchant** "Using Coulombian approach for Modeling Scalar Potential and Magnetic Field of a Permanent Magnet with Radial Polarization", **IEEE Transactions on Magnetics.**, Vol. 43, Issue 4, april 2007, pp 1261-1264, ISSN: 0018-9464
- H.L.Rakotoarison, F.Wurtz, J.Stepanek, **B. Delinchant** "Integration of the volume segmentation method into an optimization process: application to the sizing of a micro-actuator for deformable mirrors", **IEEE Transactions on Magnetics**, Vol. 42, Issue 4, april 2006, pp 1163-1166, ISSN: 0018-9464
- H.L. Rakotoarison, H. Rostaing, **B. Delinchant**, O. Cugat, "Electromagnetic microsystems modelling to achieve very constraints design requirements", **ASMDO'07**, International Conference on Multidisciplinary Design Optimization and Applications, 17-20 April 2007, Besançon , France
- H.L. Rakotoarison, **B. Delinchant**, O. Cugat "Efficient and accurate modelling of Mag-MEMS for the optimization of system design", **OIPE 2006** –September 13th – 15th 2006, Sorrento (Italy)
- H. L. Rakotoarison, **B. Delinchant**, O. Cugat "Methodology and tool for generating semi-analytical models used to pre-design electromagnetic MEMS", **CEFC 2006**, Miami, FL USA - April 30th - May 3rd 2006



- **2006-11 : Abdelhadi BESRI**, a soutenue sa thèse intitulée « Modélisation et optimisation des transformateurs planars hautes fréquences », le 26/05/2011, thèse préparée sous la direction de **Jean-Pierre KERADEC** (Keradec 50%, Delinchant 50%), financée par une bourse CNRS Entreprise avec la société **THALES Aerosystems**.

Jury composé des encadrants et de :

- François COSTA, SATIE, rapporteur
- Olivier DEBLECKER, Université de Mons, rapporteur
- Charles JOUBERT, Ampère, président
- Hervé STEPHAN, THALES Avionics, invité.

Les modèles et outils développés durant cette thèse sont utilisés chez le partenaire industriel THALES Aerosystems. Abdelhadi est ingénieur de recherche depuis septembre 2009 chez Mitsubishi Electric R&D à Nantes.

Dans ces travaux, des modèles analytiques de transformateur à technologie planar (circuit imprimé) très performants (99% de rendement) ont été réalisés. Mon implication a été principalement vis-à-vis de la mise en œuvre de ces modèles pour réaliser l'optimisation paramétrique et l'amélioration topologique du transformateur ainsi que la projection automatique de modèles fréquentiels en modèles temporels.

Les figures suivantes illustrent le principe de modélisation, de simulation dynamique et des résultats d'optimisation réalisés dans cette thèse.

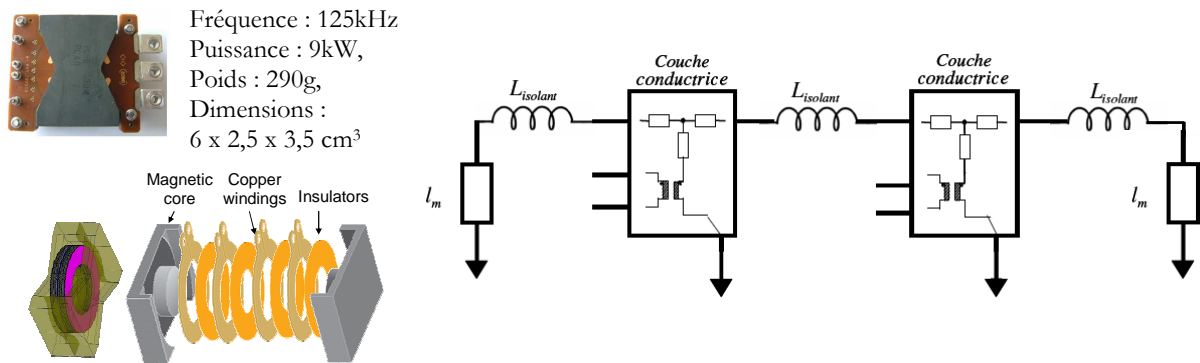


Figure 5-7 : Modélisation couche par couche d'un transformateur planar haute fréquence

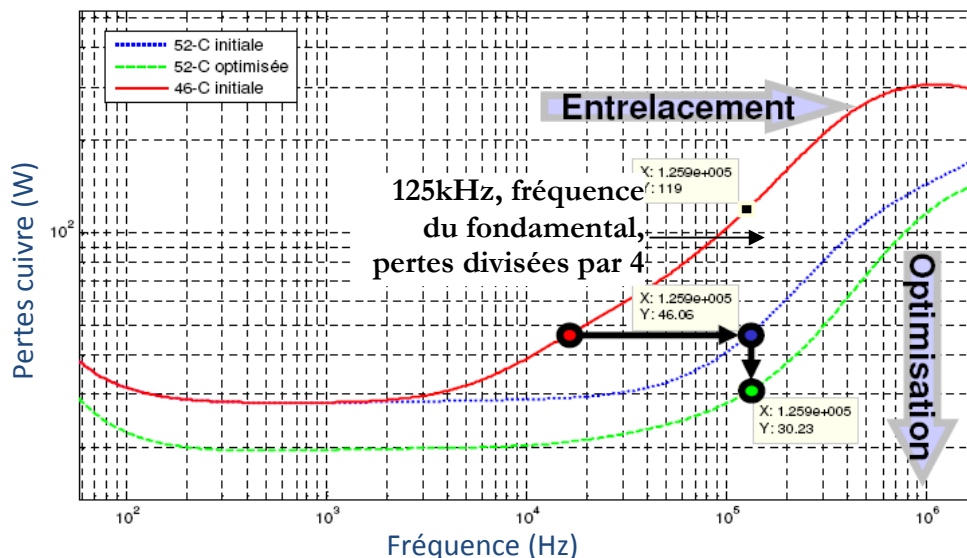


Figure 5-8 : Comparaison des pertes harmoniques pour une structure initiale, à couches entrelacées, et optimisée.

Schéma complet : 48 couches

1500 composants

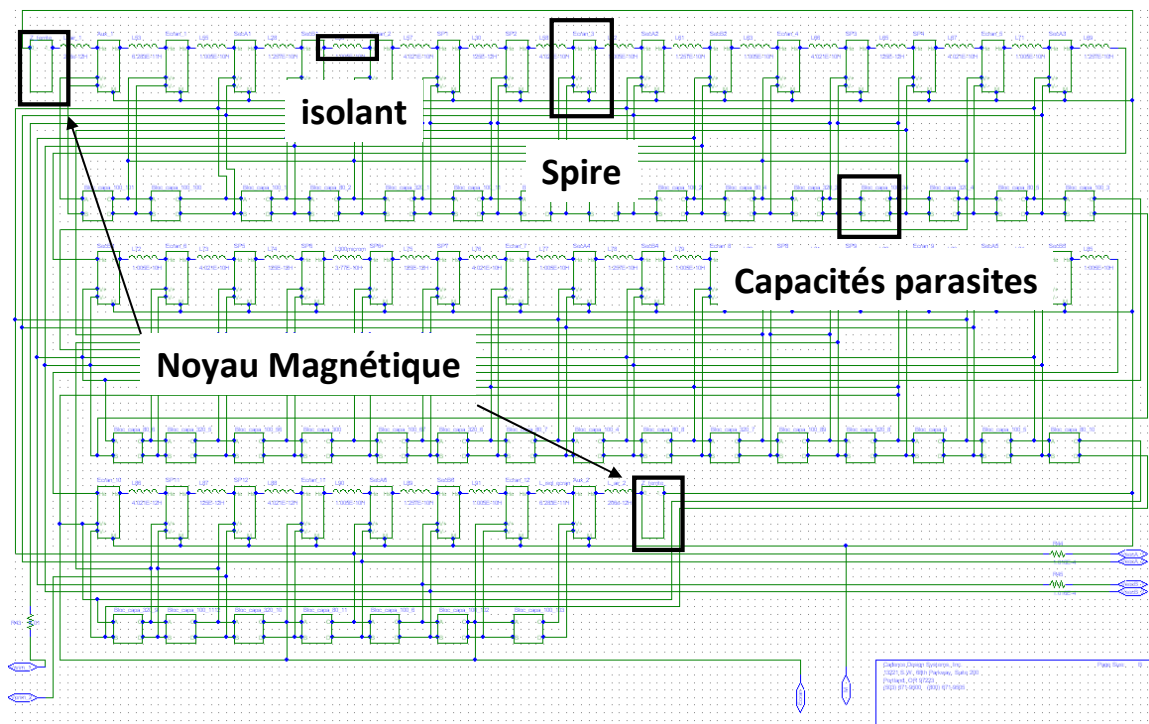


Figure 5-9 : Composition des 48 couches dans SPICE pour la réalisation d'une simulation dynamique

Publications associées :

- A. Besri, **B. Delinchant**, J.P. Keradec and C.R Sullivan, "Simulation and optimization tool for high-frequency planar transformers based on 1D analytical modelling", International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics (**IJAEM**), Volume 30, Number 3-4, pp. 223-236, 2009
- Besri A., **Delinchant B.**, Kéradec J.-P., Sullivan C., "Lumped parameter modeling to improve planar transformers design", OIPE'08, September 14 – 17, 2008, Ilmenau, GERMANY, pages : 91-92
- Besri, A.; Margueron, X.; Keradec, J.-P.; **Delinchant, B.** "Wide frequency range lumped element equivalent circuit for HF planar transformer", PESC 2008, Rhodes, Greece, June 15-19, 2008. pp 766-772
- **2008-11 : Phuong PHAM QUANG**, a soutenue sa thèse intitulée « Modélisation magnéto-mécanique d'un nano commutateur. Optimisation sous contraintes de fiabilité par dérivation automatique des programmes en Java », le 11/10/2011. La thèse a été préparée sous la direction de **Jean-Louis COULOMB** (Coulomb 50%, Delinchant 50%), financée par un contrat **CIFRE** avec la société **CEDRAT**, dans le cadre d'un projet ANR avec en particulier le **CEA/LETI**.

**Jury** composé des encadrants et de :

- Pascal BROCHET, L2EP, rapporteur
- Claude MARCHAND, LGEP, rapporteur
- Laurent KRAHENBUHL, Ampère, président
- Laurent HASCOET, INRIA, examinateur.
- Laurent DURAFOUR, CEA, examinateur
- Vincent LECONTE, CEDRAT, invité

Dans ces travaux, une méthodologie a été développée pour l'optimisation sous contrainte de fiabilité, basée sur un outil de dérivation automatique de code JAVA que nous avons déposé à

l'APP. Phuong poursuit chez CEDRAT, en CDI, le développement des logiciels de modélisation en électromagnétisme.

Dans ces travaux, les logiciels MacMMems/CADES ont été étendus afin de gérer la conception sous contraintes de fiabilité de nano systèmes magnéto-mécanique. Des modèles de déformation mécanique ont été développés dans le cadre de dispositifs spécifiques (nano commutateurs), intégrant des efforts magnétiques (couplage magnéto-mécanique) mais aussi des forces nanométriques telles que l'effet Casimir (partenariat avec le CEA/LETI et le LKB<sup>1</sup> en lien avec le projet ANR Monaco PNano).

Les figures suivantes illustrent le principe de modélisation, de simulation dynamique et des résultats d'optimisation réalisés dans cette thèse.

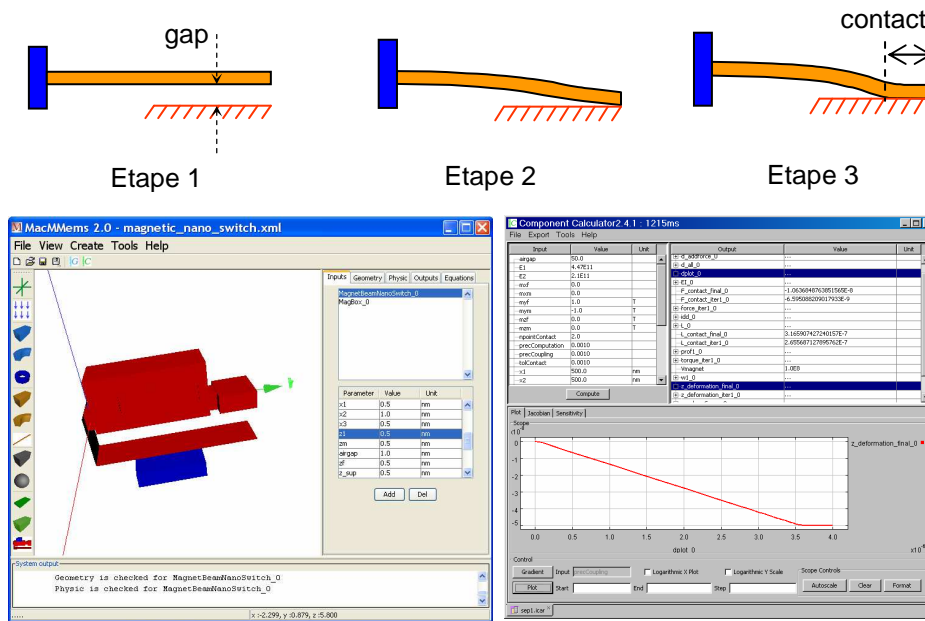


Figure 5-10 : Principe de décomposition pour la modélisation magnéto-mécanique, implémentation dans MacMMems et tracé de la déformation dans CADES

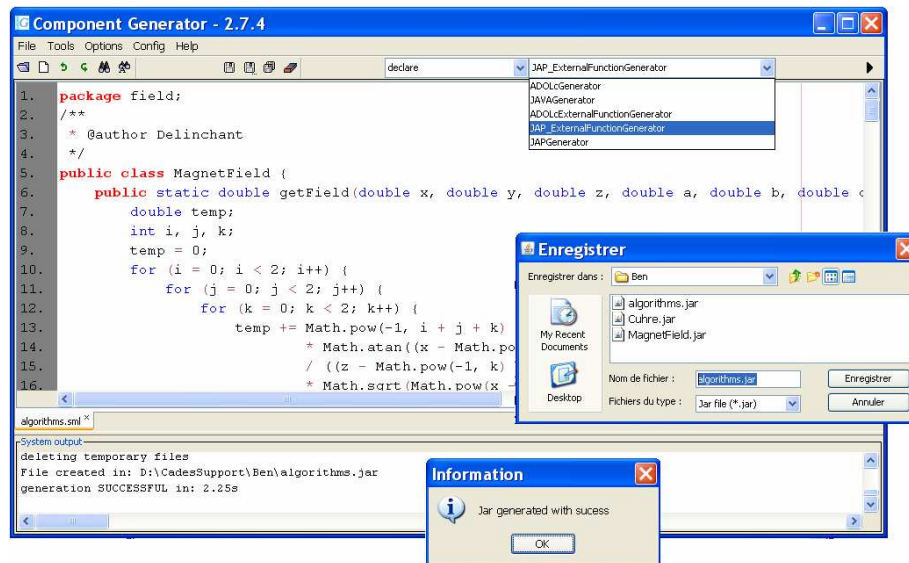


Figure 5-11 : JAP : un outil de dérivation automatique de programmes pour le calcul de sensibilité d'un modèle

<sup>1</sup> LKB : Laboratoire Kastler Brossel, équipe « Fluctuations quantiques et relativité »

Publications associées :

- P. Pham-Quang, **B. Delinchant**, J.L. Coulomb and B. Du Peloux « Semi-Analytical Magneto-Mechanic Coupling With Contact Analysis for MEMS/NEMS », **IEEE Transactions on Magnetics**, Vol. 47, No. 5, May 2011
- P. Pham-Quang, **B. Delinchant**, J.L. Coulomb and B. Du Peloux “Optimization methodology of a magnetic deformable nano switch based on semi-analytical model”, **OIPE’10**, Sofia, Bulgaria, September 14 – 18 2010
- P. Pham-Quang, **B. Delinchant**, C. Ilie, E. Slusanschi, J.L. Coulomb, and B. du Peloux “Mixing Techniques to Compute Derivatives of semi-numerical models: Application to Magnetic Nano Switch Optimization”, **COMPUMAG’11**, Sydney, Australia, July 2011
- N. Galopin, P. Pham Quang, **B. Delinchant** and J.L. Coulomb “Finite Element Modeling of deformable NEMS taking into account mechanical contact”, **COMPUMAG’11**, Sydney, Australia, July 2011

### 5.3.2 Valorisation et extension de l’approche (2 masters, 1 thèse)

Dans les travaux précédents, ma participation a été principalement axée sur la **modélisation magnétique et l’optimisation sous contraintes**. Le choix des méthodes de modélisation dans le cadre de la conception et de l’optimisation jouent un rôle essentiel.

C’est ainsi que le logiciel **MacMMems** que nous avons développé dans la thèse de Lalao Harijaona RAKOTOARISON, associé au framework CADES que nous développons dans mon équipe depuis de nombreuses années, constitue aujourd’hui la base d’un certain nombre d’autres travaux. En particulier, ce logiciel a été utilisé et amélioré dans le cadre d’un **contrat industriel avec Schneider Electric** réalisé par deux stagiaires que j’ai encadrés dont le M2R suivant.

- Mars - Juillet 2007 : **Vincent ARDON** a soutenu son stage de M2R intitulé « Contribution au développement d’un logiciel de modélisation dédié à la conception de microsystèmes magnétiques ». Le travail a été principalement d’améliorer la modélisation d’un dispositif MEMS de Schneider et l’adapter aux objectifs d’optimisation en lui ajoutant un calcul formel de sensibilité.

Publications associées :

- Rakotoarison, H.L., Ardon, V., Chadebec, O., **Delinchant, B.**, Guerin, S., Coulomb, J.-L. “Formal Sensitivity Computation of Magnetic Moment method”, **IEEE Transactions on Magnetics**, vol. 44, Issue 6, June 2008, pp. 1014 – 1017

J’ai également encadré un autre M2R sur ce logiciel dans le cadre d’un contrat avec la société SOPHYSA.

- Février – Juin 2006 : **David DIEPPEDALLE** a soutenue son stage de M2R intitulé « Modélisation et Re-conception d’une micro-valve à verrouillage magnétique pour le cerveau et de sa clé de programmation », stage financé par la société SOPHYSA. Ce travail a permis l’étude complète (modélisation, simulation, optimisation) d’un dispositif magnétique médical en s’appuyant sur les outils MacMMems/CADES. Stage confidentiel sans publication.

Les logiciels **MacMMems/CADES** constituent aujourd’hui la base d’un certain nombre d’autres travaux de recherche que je n’encadre pas (plusieurs dizaines d’utilisateurs). Il est également utilisé par des **partenaires de recherche nationaux et internationaux** (Institut Néel à Grenoble, MESA+ à l’Université de Twente en Hollande, Tyndall National Institute en Irlande, l’Université Technologique de Darmstadt en Allemagne).

Ces nombreuses collaborations m’ont permis de **participer aux travaux de thèse suivants**, donnant lieu à publications communes :

- **Thèse H. Rostaing** « Conception, modélisation et fabrication d’un micro-actionneur bistable, hors plan et magnétique », soutenue le 15/12/2004.

- H. Rostaing, J. Stepanek, **B. Delinchant**, J. Delamare and O. Cugat “Magnetic, Out-Of-Plane Bistable  $\mu$ -Actuator” **HPMA’04**, Annecy (France) 29 août.-2 sept. 2004
- H. Rostaing, J. Stepanek, **B. Delinchant**, J. Delamare, O. Cugat « Conception, modélisation et prototypage d’un micro-relais bistable magnétique » revue internationale de génie électrique (**RIGE**). 2005, vol 8 n\_5-6, pp. 703-724
- **Thèse N. Achotte** « Conception, optimisation et dimensionnement d’un micromoteur planaires à aimants permanent pour drones miniatures en vol stationnaire », soutenue le 30/09/2005
  - **B. Delinchant**, B. Du-Peloux, N. Achotte, F. Wurtz, J. Delamare, O. Cugat. “Design optimisation of integrated planar miniature magnetic motors”, **DTIP’04**, *Symposium on Design, Test, Integration and Packaging of MEMS/MOEMS*, Montreux, Suisse, 12-14 Mai 2004.
- **Thèse J. Stepanek** : « Commande et asservissement en lévitation d’un micro-actionneur magnétique bistable », soutenue le 18/07/2005.
  - **B. Delinchant**, J. Stepanek, L. Rakotoarison, J. Delamare, O. Cugat, F. Wurtz, “Capitalizing on computation tools to improve design and knowledge sharing of magnet based devices”, **HPMA’04**, Annecy (France) 29 août.-2 sept. 2004
- **Thèse Ch. Pigot** : « La lévitation Diamagnétique à l’Echelle Micrométrique: Applications et Possibilités », soutenue le 4/11/2008 et dans laquelle j’étais membre du Jury.
  - Ch. Pigot, **B. Delinchant**, G. Poulin and G. Reyne, “Optimization of a 3D micro-accelerometer based on diamagnetic levitation”, *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics (IJAEM)*, Volume 30, Number 3-4, pp. 179-188, 2009
- **Thèse P. Kauffman** « Lévitation diamagnétique sur micro-aimants : applications a la microfluidique digitale et à la biologie », soutenue le 07/12/2009.
  - P. Kauffmann, V. Haguët, G. Reyne, **B. Delinchant**, « Efficient multipoles modeling for linear magnetized beads manipulations », **CEFC 2010**, Chicago, USA, 9-12 May 2010
- **Thèse H. Allag** « Modèles et calcul des systèmes de suspension magnétique passive - développements et calculs analytiques en 2D et 3D des interactions entre aimants permanents », soutenue le 21/06/2010
  - H. Allag, J.-P. Yonnet, **B. Delinchant**, « Analytical Calculation of the Interactions between two Cylinder-shaped Magnets », **COMPUMAG 2009**, pages 574-575, 22-26 Novembre 2009, Florianópolis, BRESIL.
- **Thèse J.L.G. Janssen** « Extended Analytical Charge Modeling for Permanent-Magnet Based Devices », soutiendra le 13/12/2011
  - J.L.G. Janssen, J.J.H. Paulides, E.A. Lomonova, **B. Delinchant** and J.P. Yonnet “Design study on magnetic springs with low resonance frequency”, **LDIA 2011**, July 3-6 2011, Eindhoven, The Netherlands

### 5.3.3 Hybridation avec le calcul numérique (1 master, 1 thèse)

- **2009-12 : Christophe RUBECK**, « Calcul analytique et numérique hautes performances d’intégrales pour l’électromagnétisme basses et moyennes fréquences – Applications aux dispositifs de conversion de l’énergie électrique », **bourse fléchée école doctorale EEATS**. Thèse préparée sous la direction de **Jean-Paul YONNET** (Yonnet 33%, Delinchant 33%, Chadebec 33%). Ce travail vise à recenser, développer et capitaliser des modèles analytiques de calculs intégraux en électromagnétisme tels que ceux utilisés dans MacMMems. Il vise également à exploiter ces modèles analytiques dans des modèles numériques afin de gagner en performances (précision, rapidité, singularités). Enfin, le calcul massivement parallèle par ordinateur y est mis en œuvre.

Publications associées :

- C. Rubeck, O. Chadebec, **B. Delinchant**, J-P. Yonnet and J-L Coulomb “J-Cuda vectorized and parallelized computation strategy for solving integral equations in electromagnetism on a standard personal computer”, **COMPUMAG’11**, Sydney, Australia, July 2011

- Mars - Juillet 2010 : **Truc TRAN VAN** a soutenu son stage de M2R intitulé « Couplage de la méthode des Réductances avec la méthode Intégrale de Frontière », L’idée de ce stage et de tester une hybridation de techniques de modélisation électromagnétique adaptées aux parties ferromagnétiques (reluctances) et à l’air (intégrales de frontière).

Publications associées :

- Tran Van T., Martins Araujo D., Coulomb J.-L., **Delinchant B.**, Chadebec O., Vrijsen N.H., Jansen J.W., Lomonova E.A. “Hybridizing network reluctance and boundary integral methods: comparisons on an E-core actuator” , **COMPUMAG’11**, Sydney, Australia, July 2011

## ***5.4 Encadrements : simulation dynamique de systèmes et applicatifs bâtiment***

Les travaux présentés précédemment concernent essentiellement la conception par optimisation, basées sur des modèles statiques. La démarche méthodologique de conception développée dans les outils MacMMems/CADES permet d’une part le couplage, grâce aux concepts de composants logiciel, et également l’optimisation. Lorsque l’on aborde des **modélisations dynamiques, le couplage et l’optimisation** sont plus délicats.

### *5.4.1 Couplages de modèles en électromagnétisme (2 thèses)*

- **2009-12 : Abir REZGUI**, « VHDL-AMS : un support pour la gestion des modèles dans le cycle de conception de macro et micro systèmes magnétiques ». Thèse préparée sous la direction de **Laurent GERBAUD** (Gerbaud 50%, Delinchant 50%), financée par le projet MoCoSyMec **ANR/Cosinus** (Modélisation et Conception des Systèmes Mécatroniques). Le langage VHDL-AMS permet de décrire des systèmes d’équations différentielles prenant en compte des événements discrets. L’objectif est d’exploiter au mieux ce langage dans le cadre de la simulation dynamique d’actionneurs électromagnétiques à partir des logiciels MacMMems et Reluctool (en cours de valorisation). Un lien avec le logiciel de simulation système de Cedrat (Portunus) sera également réalisé grâce à VHDL-AMS.

Publications associées :

- A. Rezgui, L. Gerbaud, **B. Delinchant**, “VHDL-AMS to support DAE-PDE coupling and multilevel modeling” **COMPUMAG’11**, Sydney, Australia, July 2011

- A. Rezgui, L. Gerbaud, **B. Delinchant**, R.Barrak, A.Ghazel “Unified modelling technique using VHDL-AMS and software components”, **Electrimacs’11**, Cergy Pontoise, France, June 2011

Les méthodes que nous développons depuis plusieurs années sont en cours d’application dans un **nouveau domaine**, celui de la **co-simulation électrique/thermique et du control commande énergétique dans l’habitat**. Ce domaine émergent vient progressivement prendre la place de ma thématique applicative MEMS pour des raisons scientifiques et en raison de la politique de fléchage des fonds publiques liée aux besoins sociétaux.

- **2008-11 : Lounes MOKHTARI**, « Approche composants logiciels pour la simulation optimisation en vue de l’efficacité énergétique des systèmes électriques ». Thèse préparée sous la direction de **Jean-Louis COULOMB** (Coulomb 50%, Delinchant 50%), financée par une

**bourse fléchée école doctorale EEATS.** Dans ces travaux, l'approche système est abordée par la notion de couplage de modèles. Les différentes techniques de couplages sont abordées (couplage faible, fort) dans un premier temps en statique puis en dynamique. Les domaines applicatifs sont variés, allant du calcul de champ en électromagnétisme à la simulation énergétique du bâtiment.

Publications associées :

- L. Mokhtari, **B. Delinchant**, T. Chevalier, J.-L. Coulomb., « Comparing Weak and Strong PEEC-MoM Coupling », **IEEE Transactions on Magnetics**, vol. 46, Issue 8, Aug. 2010, pp. 2775 - 2778, ISSN: 0018-9464
- L. Mokhtari, **B. Delinchant**, J.-L. Coulomb, T. Le duc, O. Chadebec, J.-M. Guichon and, G. Meunier “Software Coupling and Orchestration Tool to the Modeling of Multi-physic Problems” , **COMPUMAG'11**, Sydney, Australia, July 2011

#### 5.4.2 *Multi-physique appliquée au bâtiment (2 masters, 3 thèses)*

- **2009-12 : Sana GAALOU**, « Méthodes et outils de simulation énergétiques pour le bâtiment basés sur une architecture à base de composants logiciels ». Thèse préparée sous la direction de **Frédéric WURTZ** (Wurtz 50%, Delinchant 50%), financée par le projet SimintheC **ANR/Habisol** (SIMulation et outils logiciels INteropérables pour la gestion des énergies THERmique et EleCTriques dans les bâtiments). L'objectif est ici de réaliser des simulations thermiques et électriques des bâtiments intégrant le control commande en vue de l'optimisation énergétique globale. Les couplages d'outils existants (Trnsys, EnergyPlus, Comfie, ...) ainsi que l'utilisation d'un langage de représentation standard (MODELICA) sont abordés.

Publications associées :

- Sana GAALOU, **Benoît DELINCHANT**, Frédéric WURTZ, Stéphane THIERS, Bruno PEUPORTIER “Strong coupling a thermal model derived from COMFIE with an electrically controlled heater for an hybrid simulation”, **Electrimacs'11**, Cergy Pontoise, France, June 2011
- Sana GAALOU, **Benoît DELINCHANT**, Frédéric WURTZ, Stéphane THIERS, Bruno PEUPORTIER, « Couplage d'un modèle thermique issu de COMFIE avec un chauffage régulé électriquement pour une simulation temporelle hybride à pas variable », IBPSA-France, Moret-sur-Loing, 9-10 novembre 2010
- **2010-13 : Hoang Anh DANG**, « Modélisation énergétique des équipements d'un bâtiment tertiaire pour la conception et le pilotage optimal ». **Thèse** faisant suite au **M2R** du même titre que j'ai encadré, elle est préparée sous la direction de **Frédéric WURTZ** (Wurtz 50%, Delinchant 50%), financée par une bourse ministérielle. Cette thèse s'inscrit en partie dans le projet HOMES en lien avec Schneider Electric S.A. L'objectif étant de développer des modèles d'équipements thermiques/électriques dans un but de simulation du control commande et de son optimisation.

Publications associées :

- Hoang Anh DANG, **Benoît DELINCHANT**, Sana GAALOU, Frederic WURTZ “Electrical performance optimization of an HVAC dual flow”, **Electrimacs'11**, Cergy Pontoise, France, June 2011
- Hoang Anh DANG, **Benoît DELINCHANT**, Sana GAALOU, Frédéric WURTZ « Modélisation électrique d'une VMC double flux et optimisation de sa commande pour l'efficacité énergétique », IBPSA-France, Moret-sur-Loing, 9-10 novembre 2010
- Mars - Juillet 2011 : **An PHAM DUY** a soutenu son stage de M2R intitulé « Modélisation statistique des autres usages électriques », Dans ce stage, des modèles d'équipements électriques ainsi que des modèles d'usage de ces équipement ont été proposé suite à l'étude de mesures de 100 logements pendant 1 an (base de donnée EDF).

- **2011-14 : Mathilde GRANDJACQUES**, « Méthodes et outils pour la propagation d'incertitudes des simulations en énergétique des bâtiments ». Thèse préparée sous ma direction (dérogation) (Delinchant 50%, Adrot 50%), financée par le projet ANR Habisol FIABILITE. L'objectif est de définir et de développer des techniques appropriées pour propager les incertitudes dans des modèles temporels réduits appliqués à la modélisation énergétique des bâtiments. Deux techniques sont plus précisément étudiées, la propagation des sensibilités locales basée sur les gradients et la technique ensembliste basée sur l'arithmétique d'intervalles.

#### 5.4.3 *Développements informatiques*

- Avril – juillet 2008 : **Yohan GINON**, stage de **master 2 mathématiques appliquées/informatique** spécialité ingénierie de l'image et CAO, « Développement d'un modeleur bidimensionnel paramétré ».
- Avril - juillet 2007 : **Anthony VITAL**, stage de **master 1 mathématiques et informatique option mathématiques Appliquées et industrielles**. « Développement d'un logiciel dédié à la conception de microsystemes ». L'objectif était d'affiner l'outil MacMMems aux besoins industriels (Schneider Electric), à savoir la simplification de son utilisation (outil métier) et l'apport de fonctionnalité (IHM de l'étude de sensibilité).
- Octobre 2009 – juillet 2010 : **François MILHEM**, apprenti **licence pro distribution électrique et automatismes**, mise au point de la supervision de Predis MHI (Monitoring et Habitat Intelligent) et développement d'outils de monitoring spécifiques (température, consommation, pilotage de prises électriques).
- Depuis octobre 2010 : **Franck VERDIERE**, **ingénieur de recherche** recruté sur contrat. Développement de composant logiciels pour la simulation dynamique. Projection dans différents environnements Modelica, FMI. Mise au point des *solvers* dynamiques et des interfaces graphiques associées aux outils.



### **5.5 Projets en cours, partenaires et financements associés**

- projet « MoCoSyMec » **ANR/Cosinus 2008** : Modélisation et Conception des Systèmes Mécatroniques.
  - o financement de la thèse d'Abir REZGUI
  - o partenaires : CEDRAT, Schneider Electric, InESS.
- projet « SimintheC » **ANR/Habisol 2008** : SIMulation et outils logiciels INteropérables pour la gestion des énergies THERmique et EleCtriques dans les bâtiments).
  - o financement de la thèse de Sana GAALOUL.
  - o partenaires : LOCIE, CEA INES, G-SCOP, TREFLE, ARMINES (CEP)
- projet « Plumes » **ANR/Habisol 2009** : Plateforme Logicielle Unifiée de Modélisation pour l'Efficacité énergétique du bâtiment et de ses Systèmes.
  - o financement d'un ingénieur de recherche (Franck VERDIERE)
  - o partenaires : CEA LIST, CEA INES, CSTB, G-SCOP, EDF
- projet CLIMB **ANR/Habisol 2009** : Chaîne Logicielle Intégrée pour la Modélisation du Bâtiment
  - o financement d'un ingénieur de recherche (Franck VERDIERE)
  - o partenaires : LIST, LITEN, CSTB, CNRS (Armine CEP, CETHIL, LOCIE, TREFLE, LEPTIAB, LGCGE, LIMSI, G-SCOP)
- projet FIABILITE **ANR/Habisol 2010** : Fiabilité des modèles et de la simulation des performances énergétiques des bâtiments.
  - o financement de la thèse de Mathilde GRANDJACQUES
  - o partenaires : TREFLE, ARMINES (CEP), CEA-INES, EDF, GSCOP, LOCIE, LPBS
- projet **Homes, OSEO** : Habitats et bâtiments Optimisés pour la Maîtrise de l'énergie et des Services
  - o financement d'un master recherche (An Pham DUY) + thèse Hoang Anh DANG
  - o partenaires : Schneider Electric, CSTB, CIAT, CEA, Delta Dore, EDF, Idea, Philips Lighting, Radiall, Somfy, STMicroelectronics, Watteco et Wieland Electric

### **5.6 Fonctions d'intérêts collectifs**

- depuis 2008 : Membre élu au **conseil de laboratoire** du G2ELab
- membre d'un **comité de sélection** de l'INP de Grenoble pour un poste MCF 2011.
- **J'anime depuis plusieurs années un groupe de travail** sur le logiciel CADES (valorisé en 2011 par Vesta-Systems sur [www.cades-solutions.com](http://www.cades-solutions.com)) et les composants logiciels ICAr (4 permanents, ~10 thésards), largement diffusés au sein du G2ELab, dans l'industrie et parmi des universitaires en France et à l'étranger.
- 2006-08 : Membre nommé à la **commission de spécialistes** INPG - 63ème section

## 5.7 Publications

- 20 publications de revues internationales avec comité de lecture, parues
- 50 Publications de congrès internationaux avec comité de lecture et actes parus
- 10 publications de colloques nationaux avec comité de lecture et actes

### *20 publications de revues internationales avec comité de lecture, parues*

- Delinchant, B.; Wurtz, F.; Yonnet, J.-P.; Coulomb, J.-L. “Interaction Between Ring-Shaped Permanent Magnets With Symbolic Gradients: Application to Magnetic Bearing System Optimization”, **IEEE Transactions on Magnetics**, Vol. 47, No. 5, May 2011
- Quang, P.P., Delinchant, B., Coulomb, J.L.; du Peloux, B « Semi-Analytical Magneto-Mechanic Coupling With Contact Analysis for MEMS/NEMS », **IEEE Transactions on Magnetics**, Vol. 47, No. 5, May 2011
- L. Mokhtari, B. Delinchant, T. Chevalier, J.-L. Coulomb., « Comparing Weak and Strong PEEC-MoM Coupling », **IEEE Transactions on Magnetics**, vol. 46, Issue 8, Aug. 2010, pp. 2775 - 2778, ISSN: 0018-9464
- B. Delinchant, H.L. Rakotoarison, V. Ardon, O. Chadebec and O. Cugat, “Gradient based optimization of semi-numerical models with symbolic sensitivity: Application to a simple ferromagnetic MEMS switch device”, *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics (IJAEM)*, Volume 30, Number 3-4, pp.189-200, 2009
- Ch. Pigot, B. Delinchant, G. Poulin and G. Reyne, “Optimization of a 3D micro-accelerometer based on diamagnetic levitation”, *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics (IJAEM)*, Volume 30, Number 3-4, pp. 179-188, 2009
- A. Besri, B. Delinchant, J.P. Keradec and C.R Sullivan, “Simulation and optimization tool for high-frequency planar transformers based on 1D analytical modelling”, *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics (IJAEM)*, Volume 30, Number 3-4, pp. 223-236, 2009
- P. Enciu, F. Wurtz, L. Gerbaud, B. Delinchant “Automatic differentiation for electromagnetic models used in optimization”, **COMPEL: The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering**; Vol 28, Issue: 5, pp 1313 - 1326, 2009, ISSN: 0332-1649
- Delinchant B., Grusso G., Wurtz F. “Two Levels Modeling for the Optimization of Electromagnetic Actuators”, **IEEE Transactions on Magnetics**, vol. 45, issue 3, March 2009, pp. 1724-1727, ISSN: 0018-9464
- Rakotoarison, H.L., Ardon, V., Chadebec, O., Delinchant, B., Guerin, S., Coulomb, J.-L. “Formal Sensitivity Computation of Magnetic Moment method”, **IEEE Transactions on Magnetics**, vol. 44, Issue 6, June 2008, pp. 1014 – 1017, ISSN: 0018-9464
- B. Delinchant, D. Duret, L. Estrabaut, L. Gerbaud, H. Nguyen Huu, B. Du Peloux, H.L. Rakotoarison, F. Verdier, F. Wurtz, “An optimizer using the software component paradigm for the optimization of engineering systems”, **COMPEL: The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering**; Vol 26, Issue: 2, pp 368 - 379, 2007
- H. Chetouani, B. Delinchant, G. Reyne, “Efficient modeling approach for optimization of a system based on passive diamagnetic levitation as a platform for bio-medical applications”, **COMPEL**, Vol 26, Issue: 2, pp, 345 – 355, 2007
- H. L. Rakotoarison, J. P. Yonnet, B. Delinchant “Using Coulombian approach for Modeling Scalar Potential and Magnetic Field of a Permanent Magnet with Radial Polarization”, **IEEE Transactions on Magnetics**., Vol. 43, Issue 4, april 2007, pp 1261-1264, ISSN: 0018-9464
- H. Chetouani, H. Rostaing, F. Wurtz, G. Reyne, B. Delinchant “A novel sizing environment (DSP-1) dealing with semi-numerical models applied to the optimization of a bi-stable out-of-plane magnetic micro-switch”, **IEEE Transactions on Magnetics**, Vol. 42, Issue 4, april 2006, pp 1231- 1234, ISSN: 0018-9464
- H.L.Rakotoarison, F.Wurtz, J.Stepanek, B. Delinchant “Integration of the volume segmentation method into an optimization process: application to the sizing of a micro-actuator for deformable mirrors”, **IEEE Transactions on Magnetics**, Vol. 42, Issue 4, april 2006, pp 1163-1166, ISSN: 0018-9464

- H. Rostaing, J. Stepanek, B. Delinchant, J. Delamare, O. Cugat « Conception, modélisation et prototypage d'un micro-relais bistable magnétique » *revue internationale de génie électrique (RIGE)*. 2005, vol 8 n\_5-6, pp. 703-724
- B. Delinchant, F. Wurtz, D. Magot, L. Gerbaud "A component-based framework for the composition of simulation software modeling electrical systems", *Journal of Simulation, Society for Modeling and Simulation International, Special Issue: Component-Based Modeling and Simulation*. Jul 2004; vol. 80: pp 347 - 356.
- B. Delinchant, F. Wurtz, « Un environnement pour la mise en œuvre rapide de modèles et de processus de conception » *revue internationale de génie électrique (RIGE)*. Volume 7 – n° 5-6/2004 - 26 pages, pp 699 à 724
- B. Delinchant, F. Wurtz, E. Atienza, "Reducing sensitivity analysis time cost of compound model", *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 40 No. 2, mars 2004, pp 1216-1219, ISSN: 0018-9464
- B. Delinchant, F. Wurtz, J. Fandino, "Mixing of FEM and Analytical Modeling for the Preliminary Design of a Transformer", *KLUWER Academic Publishers, dans le livre "Optimization and Inverse Problems in Electromagnetism"*, Editeurs : M. Rudnicki, S. Wiak, September 2003, ISBN 1-4020-1506-2, Hardbound
- V. Riboulet, P. Marin, F. Noël, B. Delinchant and L. Gerbaud "Tools for Dynamic Sharing of Collaborative Design Information" *KLUWER Academic Publishers, dans le livre "Recent Advances in Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering"*, Editeurs : G. Gogu, D. Coutellier, P. Chedmail, P. Ray. ISBN 1-4020-1163-6 mars 2003, pp493-502.
- B. Delinchant, V. Riboulet, L. Gerbaud, P. Marin, F. Noël, F. Wurtz "Cooperative Design among Mechanical and Electrical Engineers over the Internet: some Implications for Tools supporting Human Communication Between Various Professional Cultures", *IEEE Transactions on Professional Communication. Special Issue: International Communication, Technology, and Culture*. Vol. 45, No. 4, Dec. 02, pp. 231-249, ISSN 0361-1434.

### **50 Publications de congrès internationaux avec comité de lecture et actes parus**

- S. Gaaloul, F. Verdière, B. Delinchant, F. Wurtz, "Interface Component Architecture for building simulation", Conférence IBPSA world 2011 - Novembre 2011- Sydney
- J.L.G. Janssen, J.J.H. Paulides, E.A. Lomonova, B. Delinchant and J.P. Yonnet "Design study on magnetic springs with low resonance frequency",
- A. Rezgui, L. Gerbaud, B. Delinchant, R.Barrak, A.Ghazel "Unified modelling technique using vhdl-ams and software components", ELECTRIMACS 2011, 6-8th June 2011, Cergy-Pontoise, France
- H. A. Dang, B. Delinchant, S. Gaaloul, F. Wurtz "Electrical performance optimization of an HVAC dual flow", ELECTRIMACS 2011, 6-8th June 2011, Cergy-Pontoise, France
- S. Gaaloul, B. Delinchant, F. Wurtz, S. Thiers, B. Peuportier " Strong coupling of a building thermal model with a controlled electrical heater for an hybrid energy simulation ", ELECTRIMACS 2011, 6-8th June 2011, Cergy-Pontoise, France
- B.Delinchant, D.Lahaye, F.Wurtz, J.-L. Coulomb "Manifold mapping optimization with or without true gradients", ELECTRIMACS 2011, 6-8th June 2011, Cergy-Pontoise, France
- C. Rubeck, O. Chadebec, B. Delinchant, J-P. Yonnet and J-L Coulomb "JCuda vectorized and parallelized computation strategy for solving integral equations in electromagnetism on a standard personal computer", **COMPUMAG'11**, Sydney, Australia, July 2011
- A. Rezgui, L. Gerbaud, B. Delinchant, "VHDL-AMS to support DAE-PDE coupling and multilevel modeling" **COMPUMAG'11**, Sydney, Australia, July 2011
- P. Pham-Quang, B. Delinchant, C. Ilie, E. Slusanschi, J.L. Coulomb, and B. du Peloux "Mixing Techniques to Compute Derivatives of semi-numerical models: Application to Magnetic Nano Switch Optimization", **COMPUMAG'11**, Sydney, Australia, July 2011
- L. Mokhtari, B. Delinchant, J-L. Coulomb, T. Le duc, O. Chadebec, J-M. Guichon and, G. Meunier "Software Coupling and Orchestration Tool to the Modeling of Multi-physic Problems" , **COMPUMAG'11**, Sydney, Australia, July 2011
- Tran Van T., Martins Araujo D., Coulomb J.-L., Delinchant B., Chadebec O., Vrijsen N.H., Jansen J.W., Lomonova E.A. "Hybridizing network reluctance and boundary integral methods: comparisons on an E-core actuator" , **COMPUMAG'11**, Sydney, Australia, July 2011

- N. Galopin, P. Pham Quang, B. Delinchant and J.L. Coulomb “Finite Element Modeling of deformable NEMS taking into account mechanical contact”, **COMPUMAG’11**, Sydney, Australia, July 2011
- Duret, D.; Gerbaud, L.; Wurtz, F.; Rezgui, A.; Delinchant, B.; Cogitore, B.; “Optimisation and simulation methodology for passive ADSL splitter design”, Symbolic and Numerical Methods, Modeling and Applications to Circuit Design, **SM2ACD 2010**, Gammarth, Tunisia, October 5-6 2010.
- Quang, P.P., Delinchant, B., Coulomb, J.L.; du Peloux, B « Semi-analytical Magnetic-Structural coupling with contact analysis for MEMS/NEMS », **CEFC 2010**, Chicago, USA, 9-12 May 2010
- Benoît Delinchant, Frédéric Wurtz, Jean-Paul Yonnet, Jean-Louis Coulomb, « Interaction between ring shaped permanent magnets with symbolic gradients: application to magnetic bearing system optimization », **CEFC 2010**, Chicago, USA, 9-12 May 2010
- P. Kauffmann, V. Haguët, G. Reyne, B. Delinchant, « Efficient multipoles modeling for linear magnetized beads manipulations », **CEFC 2010**, Chicago, USA, 9-12 May 2010
- Ghaith WARKOZEK, Stéphane PLOIX, Frédéric WURTZ, Mireille JACOMINO, Benoit DELINCHANT « Stability study for optimal energy management in multisources building », **OIPE 2010**, Sofia, Bulgaria, September 14 – 18 2010
- P. Pham-Quang, B. Delinchant, J.L. Coulomb and B. Du Peloux “Optimization methodology of a magnetic deformable nano switch based on semi-analytical model”, **OIPE 2010**, Sofia, Bulgaria, September 14 – 18 2010
- Guillaume Foggia, Benoît Delinchant, Nouredine Hadjsaid, Frédéric Wurtz “Optimization by stochastic programming for the aggregation of a commercial virtual power plant”, **OIPE 2010**, Sofia, Bulgaria, September 14 – 18 2010
- H. Allag, J.-P. Yonnet, B. Delinchant, « Analytical Calculation of the Interactions between two Cylinder-shaped Magnets », **COMPUMAG 2009**, pages 574-575, 22-26 Novembre 2009, Florianópolis, BRESIL.
- T. Le Duc, O. Chadebec, J.-M. Guichon, G. Meunier, Y. Lembeye, B. Delinchant, « Numerical experimentations on the coupling between PEEC and volume integral method », **COMPUMAG 2009**, pages 7-8, 22-26 Novembre 2009, Florianópolis, BRESIL.
- L. Mokhtari, B. Delinchant, T. Chevalier, J.-L. Coulomb., « Comparing Weak and Strong PEEC-MoM Coupling », **COMPUMAG 2009**, pages 83-84, 22-26 Novembre 2009, Florianópolis, BRESIL.
- Delinchant B., Gerbaud L., Wurtz F., «Parallelisation of quasi-static simulations of moving system: Application to the optimization of magnetic micro switch», **NUMELEC 2008**, Liège Belgique, Pages 84-85, 08-11 dec2008
- Pigot C., Delinchant B., Reyne G., “Optimization of a 3D micro-accelerometer based on diamagnetic levitation”, **OIPE’08**, September 14 – 17, 2008, Ilmenau, GERMANY, pages : 194-195
- Delinchant B., Rakotoarison H. L., Ardon V., Chadebec O., Cugat O., “Gradient based optimization of semi-numerical models with symbolic sensitivity: Application to a simple ferromagnetic MEMS switch device”, **OIPE’08**, September 14 – 17, 2008, Ilmenau, GERMANY, pages : 192-193
- Petre Enciu, Harijaona Lalao Rakotoarison, Benoît Delinchant, Frédéric Wurtz, Laurent Gerbaud, Laurence Estrabaut “A software for analytical modelling and numerical algorithms interaction for gradient based optimization”, **OIPE’08**, September 14 – 17, 2008, Ilmenau, GERMANY, pages : 166-167
- Besri A., Delinchant B., Kéradec J.-P., Sullivan C., "Lumped parameter modeling to improve planar transformers design", **OIPE’08**, September 14 – 17, 2008, Ilmenau, GERMANY, pages : 91-92
- Delinchant B., Grusso G., Wurtz F. “Two Levels Modeling for the Optimization of Electromagnetic Actuators” **CEFC 2008**, Athens, Grèce, 11-15 may 2008
- Besri, A.; Margueron, X.; Keradec, J.-P.; Delinchant, B. “Wide frequency range lumped element equivalent circuit for HF planar transformer”, **PESC 2008**, Rhodes, Greece, June 15-19, 2008. pp 766-772
- H. Chetouani, L.H. Rakotoarison, B. Delinchant, G. Grusso, A.Canova, M. Repetto “Graphite Levitation over four Magnets: Benchmarking Micrometer Dia-Magnetic Modeling”, **COMPUMAG 2007**, 16th International Conference on the Computation of Electromagnetic Fields, June 24-28, 2007, Aachen, Germany
- H.L. Rakotoarison, O. Chadebec, B. Delinchant, J.-L. Coulomb “Formal Sensitivity Computation of Magnetic Moment method Applied to Linear Ferromagnetic Materials”, **COMPUMAG 2007**, June 24-28, 2007, Aachen, Germany

- Hieu Nguyen-Huu, F. Wurtz, N. Retière, B. Delinchant, "Composition of Optimization Algorithms by using Software Components for Optimization of Electromagnetic Devices", **COMPUMAG 2007**, June 24-28, 2007, Aachen, Germany
- Chetouani, H. Haguët, V. Jeandey, C. Pigot, C. Walther, A. Dempsey, N. M. Chatelain, F. Delinchant, B. Reyne, G. "Diamagnetic Levitation of Beads and Cells Above Permanent Magnets", Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conference, **TRANSDUCERS 2007**. pp: 715-718, Lyon, France, 10-14 June 2007, ISBN: 1-4244-0842-3
- H.L. Rakotoarison, H. Rostaing, B. Delinchant, O. Cugat, "Electromagnetic microsystems modelling to achieve very constraints design requirements", **International Conference on Multidisciplinary Design Optimization and Applications**, 17-20 April 2007, Besançon, France
- B. Delinchant "Interval Arithmetic for the Design of Electrical Engineering Systems", **OIPE 2006** –September 13th – 15th 2006, Sorrento (Italy)
- H. Chetouani, B. Delinchant, G. Reyne "Efficient modeling approach for optimization of a system based passive diamagnetic levitation as a platform for bio-medical applications" **OIPE 2006** –September 13th – 15th 2006, Sorrento (Italy)
- B. Delinchant, B. Du Peloux, L. Estrabaut, F. Wurtz, L. Gerbaud "A proposal of a norm for Black Box Components dedicated to the Design and Optimization of Engineering Systems", **OIPE 2006** –September 13th – 15th 2006, Sorrento (Italy)
- H.L. Rakotoarison, B. Delinchant, O. Cugat "Efficient and accurate modelling of Mag-MEMS for the optimization of system design", **OIPE 2006** –September 13th – 15th 2006, Sorrento (Italy)
- Wurtz, Frédéric; Delinchant, Benoit; Nguyen, Huu Hieu; Verdière, Franck; Bergeon, Stéphane "An Optimizer using the Software Component Paradigm for the Optimization of Engineering Systems", **OIPE 2006** –September 13th – 15th 2006, Sorrento (Italy)
- H. L. Rakotoarison, B. Delinchant, O. Cugat "Methodology and tool for generating semi-analytical models used to pre-design electromagnetic MEMS", **CEFC 2006**, Miami, FL USA - April 30th - May 3rd 2006
- B. Delinchant, B. Du-Peloux, N. Achotte, F. Wurtz, J. Delamare, O. Cugat. "Design optimisation of integrated planar miniature magnetic motors", **DTIP'04, Symposium on Design, Test, Integration and Packaging of MEMS/MOEMS**, Montreux, Suisse, 12-14 Mai 2004.
- V. Fischer, B. Delinchant, F. Wurtz, and L. Gerbaud "Using Software Components for Multi-disciplinary Optimization", **CEFC'04**, Séoul, Corée, 6-9 juin 2004
- B. Delinchant, J. Stepanek, L. Rakotoarison, J. Delamare, O. Cugat, F. Wurtz, "Capitalizing on computation tools to improve design and knowledge sharing of magnet based devices", **HPMA'04**, Annecy (France) 29 août.-2 sept. 2004
- F. Wurtz, B. Delinchant, "Design complexity of magnets based actuators, solved by a component software framework", **HPMA'04**, Annecy (France) 29 août.-2 sept. 2004
- H. Rostaing, J. Stepanek, B. Delinchant, J. Delamare and O. Cugat "Magnetic, Out-Of-Plane Bistable  $\mu$ -Actuator" **HPMA'04**, Annecy (France) 29 août.-2 sept. 2004
- D. Magot, F. Wurtz, B. Cogitore, B. Delinchant, J.-P. Keradec. "A Methodology and Tools for Worst-Case Tolerance Design", dans les actes de **COMPUMAG'03, 14th Conference on the Computation of Electromagnetics Fields**, 13-18 juillet 2003, à Saratoga Springs, New York, Etats-Unis d'Amérique.
- B. Delinchant, E. Atienza, L. Gerbaud, F. Wurtz, "Concurrent design versioning system, based on XML file", dans les actes de **IECON'02, 28th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society**, Sevilla, Espagne, Nov. 5-8 2002. ISBN: 0-7803-7474-6, pp 2485-2490
- B. Delinchant, F. Wurtz, E. Atienza, J. Bignon "Benefits of component methodology applied to electrical software", dans les actes de **ELECTRIMACS'02, 7th International Conference on Modeling and Simulation of Electric Machines, Converters and Systems**, Montréal, Québec, 18-21 août 2002
- B. Delinchant, F. Wurtz, J. Bignon "Automating tool integration to preliminary design request", actes **CEFC'02, 10th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation**, Perugia, Italie, 16-19 juin 2002.
- B. Delinchant, F. Wurtz, E. Atienza, J. Bignon "Components Approach - The integration way for electromagnetic simulation software", dans les actes de **COMPUMAG'01, 13th Conference on the Computation of Electromagnetics Fields**, Evian, France, 2-5 juillet 2001. Vol. 2, pp 226-227.

## 10 publications de colloques nationaux avec comité de lecture et actes

- Hicham ALLAG, Jean-Paul YONNET, H.R.E.H. BOUCHEKARA, Mohamed El Hadi LATRECHE and Benoit DELINCHANT « Rectangular discretization approach for calculation of magnetic quantities from charged surfaces », Colloque National sur l'Inductique : Application de l'Induction Electromagnétique, Béjaïa, le 03 et le 04 MAI 2011
- Hoang Anh DANG, Benoît DELINCHANT, Sana GAALOUL, Frédéric WURTZ « Modélisation électrique d'une VMC double flux et optimisation de sa commande pour l'efficacité énergétique », **IBPSA-France**, Moret-sur-Loing, 9-10 novembre 2010
- Sana GAALOUL, Benoît DELINCHANT, Frédéric WURTZ, Stéphane THIERS, Bruno PEUPORTIER, « Couplage d'un modèle thermique issu de COMFIE avec un chauffage régulé électriquement pour une simulation temporelle hybride à pas variable », **IBPSA-France**, Moret-sur-Loing, 9-10 novembre 2010
- B. Delinchant, L. Gerbaud, F. Wurtz, « A framework based on software components for design and optimization in engineering » *Second Conference on Simulation and Multidisciplinary Design Optimization*, 23-24 Mai 2006 – Belfort, France
- B. Delinchant, N. Bernard, Eh. Zaim « Interactions entre modélisation et dimensionnement : application aux machines rapides », *Electrotechnique du Futur (EF'05)*, 14-15 septembre 2005, Grenoble.
- N. Bernard, B. Delinchant, H. Ben Ahmed, M. Zaïm « Influence du choix des matériaux magnétiques sur l'optimisation des machines synchrones » *Electrotechnique du Futur (EF'05)*, 14-15 septembre 2005, Grenoble.
- H. Chetouani, F. Wurtz, G. Reyne, H. Rostaing, B. Delinchant « Optimisation d'un micro-actionneur magnétique bistable vertical » *Electrotechnique du Futur (EF'05)*, 14-15 septembre 2005 Grenoble.
- H. L. Rakotoarison, O. Cugat, J. Stepanek, F. Wurtz, B. Delinchant « Optimisation d'un micro-actionneur électromagnétique pour miroir déformable » *Electrotechnique du Futur (EF'05)*, 14-15 septembre 2005 Grenoble.
- B. Delinchant, F. Wurtz, « Une architecture à base de composants logiciels pour la capitalisation et la ré - utilisation de connaissances formelles dans les bureaux de R&D » *Colloque IPI '04 "Information, Compétences et Connaissances dans les systèmes productifs"* Autrans, 22 – 23 janvier 2004, pp 273-285
- B. Delinchant, V. Riboulet, "Modes de communication et échanges d'information en conception distribuée via internet" *Colloque IPI '02 (Institut de la Production et des organisations Industrielles) "Concevoir et organiser la performance industrielle"* Autrans, 28-29-30 janvier 2002.

## 5.8 Enseignements

### 5.8.1 Matières enseignées

IUT1 – département Génie Electrique et Informatique Industrielle (L1, L2, L3)

- mathématiques,
- informatique industrielle, programmation objet,
- automatismes et réseaux industriels
- électrotechnique, électronique

UJF - UFR physique ; + vacations en école d'ingénieur G-INP ENSE3 (M2, M2R)

- Optimisation
- Conception / Eco-Conception

### 5.8.2 Volumes horaires

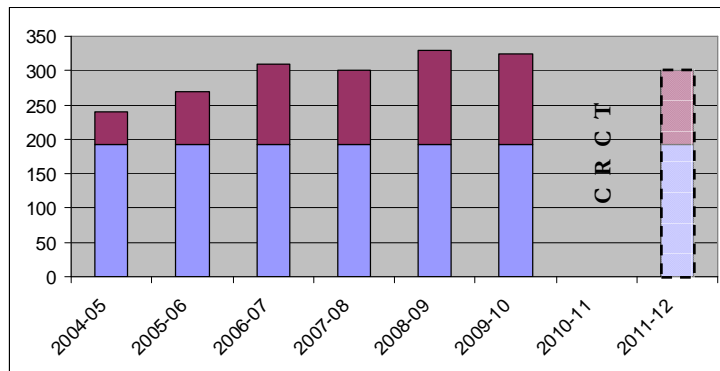


Figure 5-12 : Volume horaire annuel d'enseignement (équivalent TD)

### 5.8.3 Responsabilités pédagogiques et administratives

J'ai plus particulièrement pris des responsabilités et monté les enseignements en :

- Optimisation
- Conception / Eco-Conception
- Programmation appliquée aux communications industrielles et tertiaires

J'ai été jusqu'à mon CRCT, de 2006 à 2010, **directeur des études** de la licence professionnelle « Distribution Electrique et Automatismes Industriels » en formation initiale.

### 5.8.4 Liens enseignement / recherche

Les enseignements en optimisation, conception et éco-conception que j'ai mis en place dans différentes filières au niveau master, sont directement issus des méthodes de modélisation et de conception développées en recherche dans mon équipe. Les étudiants bénéficient ainsi d'un apport innovant pour les entreprises dans lesquelles ils vont travailler. En retour, ils m'apportent un regard intéressant vis-à-vis de l'usage des outils que je leur propose.

Mon implication récente en recherche dans le domaine du bâtiment est l'occasion de faire un lien avec mes activités d'enseignement à l'IUT sur ce domaine. C'est en particulier dans les disciplines de l'automatisme et de l'informatique industrielle que j'arrive aujourd'hui à faire cohabiter mes deux activités. J'interviens également en école d'ingénieur dans ce domaine, où je fais bénéficier aux élèves ingénieurs à la fois de mes activités de recherche mais aussi de mes activités technologiques liées à l'IUT.