

Modèles analytiques simplifiés des composants de puissance passifs et actifs pour la conception optimale de convertisseurs

Julien BRUNELLO*, Jeremy BOURDON**, Francois FOREST*,
Thierry MEYNARD**, Jean-Jacques HUSELSTEIN*, E. Labouré***

* IES/Université Montpellier 2, ** LAPLACE/INPT, *** LGEP

RESUME – Ce papier présente une démarche de construction de modèles et d'outils destinés à la conception optimale des convertisseurs de l'électronique de puissance. Elle est dédiée à la représentation des composants de puissances des étages de conversion, dispositifs à semi-conducteurs, composants magnétiques et condensateurs. L'objectif poursuivi est d'associer en tout ou partie différentes approches, descriptions physiques, analyses empiriques, exploitation de bases de données, simulations numériques, afin d'établir des modèles suffisamment efficaces et représentatifs de ces composants pour être intégrés dans des procédures réalisant l'optimisation d'un convertisseur complet à architecture donnée. La première partie présentera la philosophie générale de la démarche avec la définition d'un cahier des charges type pour ces modèles puis une seconde partie présentera les travaux déjà réalisés en ce qui concerne les principaux composants considérés, plus particulièrement les composants passifs.

MOTS-CLES – Composants de puissance, conception, optimisation, modèles pour la conception

1. Introduction

La conception assistée en électronique de puissance est une problématique aussi ancienne que la discipline elle-même mais force est de constater que le prototypage virtuel, aboutissement logique de cette démarche, y est beaucoup moins avancé que dans d'autres domaines comme la micro-électronique ou la mécanique. Ainsi, dans une sorte de jungle à la fois topologique (multiplicité des architectures de convertisseurs) et technologique (diversité de l'offre sur les composants et matériaux), le choix optimal d'une structure de conversion pour une spécification donnée reste un exercice difficile. Pourtant, la puissance cumulée des outils d'analyses et de résolution, simulateurs de circuits, codes "éléments finis", solveurs de toutes natures, et de leur support matériel, ordinateurs personnels ou stations, offre un potentiel considérable. L'objectif de ce papier n'est pas d'analyser les causes et conséquences de cet état de fait et encore moins de proposer une solution définitive pour y remédier mais beaucoup plus modestement de présenter une contribution à la construction de modèles qu'il est obligatoire de mettre en place et de faire évoluer pour espérer avancer dans ce domaine de la conception optimale. De notre point de vue, le concepteur de circuit n'a pas vocation à être un spécialiste des méthodes d'optimisation qui permettront de réaliser l'emballage final des outils de conception tant attendus. Ces méthodes sont nombreuses, bon nombre d'entre-elles sont "démocratisées" par des applications puissantes et ce n'est pas un problème majeur de faire appel à des compétences extérieures pour aborder correctement cet aspect de la question. Par contre, ce concepteur est le mieux placé pour définir les besoins de la conception assistée du domaine et surtout, pour réaliser le travail-clé qui consiste à développer les modèles évoqués plus haut et qui concerne des composants dont il connaît bien la technologie, dont il maîtrise le choix et la mise en œuvre et dont, le cas échéant, il doit lui-même définir le design (exemple des composants magnétiques).

Quel est en fait le véritable besoin ? Deux configurations peuvent se présenter. La première concerne principalement les composants magnétiques et les refroidisseurs. Dans une large mesure, ils peuvent être entièrement définis par le concepteur de circuit, qui optimise les formes et le choix des matériaux, soit à partir d'éléments standards en les adaptant (exemple des noyaux magnétiques ou des profilés), soit dans une logique de développement spécifique. Ils seront ensuite réalisés sous forme de prototypes ou de séries dans une filière industrielle. Dans ce cas, les modèles ont une double utilité: ils permettent la définition technologique du composant tout en l'optimisant à critères donnés dans le cadre plus général du convertisseur. La seconde configuration est celle des condensateurs et composants à semi-conducteurs. Dans la majorité des contextes de R et D, le concepteur n'intervient pas dans la définition de ces composants, il les choisit parmi les très nombreuses séries standards produites industriellement. Dans ce cas, les

modèles recherchés auront pour unique objectif de permettre l'optimisation globale, avec comme principale contrainte d'être suffisamment représentatifs de l'état de l'art industriel, auquel correspond une offre par nature discrétisée.

La philosophie proposée dans cette publication est une tentative de généralisation d'une approche utilisée depuis de nombreuses années pour les composants magnétiques. Sur la base d'un objectif clairement énoncé de représentation des composants, elle associe différentes approches complémentaires pour tenter d'aboutir à une formulation quasi-analytique de cette représentation.

La première partie décrira plus précisément cette philosophie et le cahier des charges imposé à ces modèles. Elle donnera également les grandes lignes de leur exploitation dans une logique d'optimisation. Un bilan des principales grandeurs associées à la mise en place de ce modèle-type pour chacune des familles de composants visées sera également établi.

La seconde partie décrira pour ces mêmes familles les travaux déjà réalisés, sachant que le chemin est encore long pour disposer d'un ensemble complet et cohérent. Ainsi, dans chaque cas, les "blancs" restant à remplir seront mis en évidence ainsi que les voies de résolution envisagées.

2. Philosophie générale – Modèle type

La philosophie générale sur laquelle s'appuient les différents modèles développés est illustrée par le schéma de la Figure 1. Elle est basée sur le fait que les températures de fonctionnement des éléments considérées sont des variables critiques qu'il est essentiel de maîtriser. Les modèles que nous recherchons (en fait typiquement et principalement des systèmes d'équations analytiques) doivent permettre d'estimer correctement un vecteur température en fonction d'un vecteur géométrique (ou inversement) pour un composant d'un type donné, en alimentant parallèlement ces modèles avec toutes les données pertinentes relatives au composant considéré.

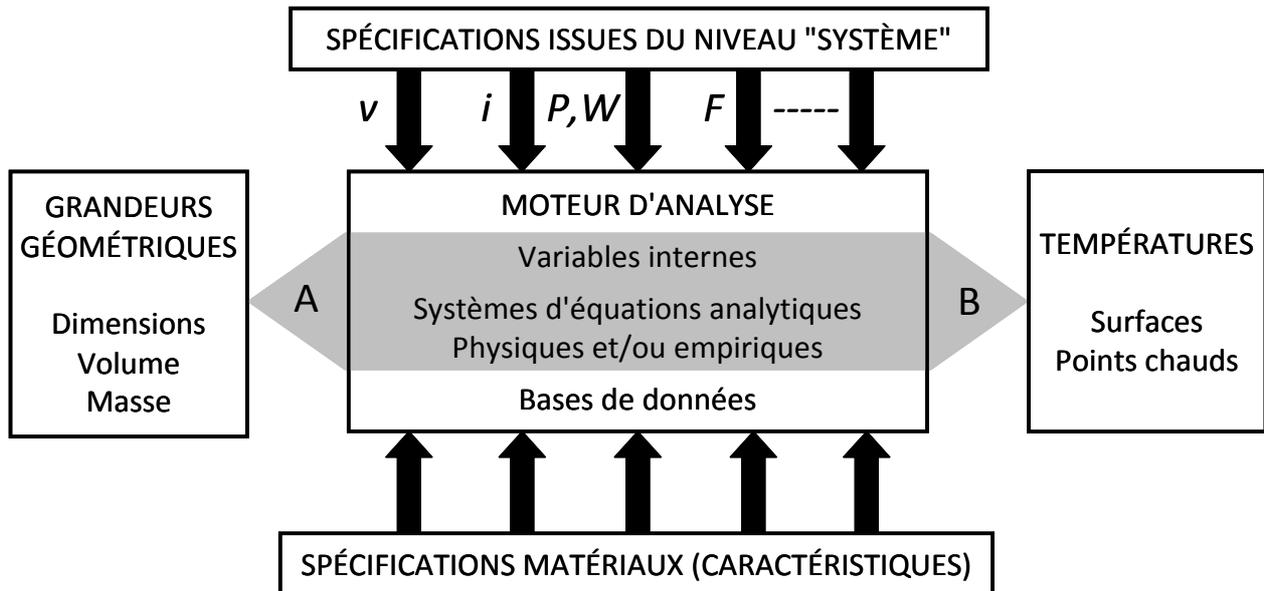


Figure 1 : Principales caractéristiques attendues pour les modèles

Les données qui alimentent ces modèles sont de deux types. Le premier groupe correspond aux figures imposées par l'étage supérieur, donc le système, dans notre cas un convertisseur ou un ensemble de convertisseurs. Le second groupe est relatif à différents paramètres physiques dont le moteur d'analyse a besoin pour traiter les spécificités d'un composant donné. Il s'agira principalement de caractéristiques des matériaux qui interviennent dans la structure de ce composant. Eux-mêmes devront faire l'objet d'un choix mais qui relève pour nous de l'expert humain et pas de "l'expert logiciel", en tout cas au niveau d'avancement où nous sommes.

Le moteur de résolution manipulera également des variables dites internes, qui ne sont ni des spécifications, ni des dimensions, ni des températures mais qui sont nécessaires aux formulations analytiques et apportent des informations sur les contraintes internes subies par les différents constituants du composant. Le Tableau 1 tente de préciser à quoi correspondent les différents éléments du schéma ci-dessus, si l'on se place dans la perspective des composants de l'électronique de puissance.

La philosophie de construction des modèles qui seront proposés dans la suite tente également de respecter les trois règles majeures suivantes :

- Toutes les options doivent être envisagées, et éventuellement être associées, pour se ramener à une résolution analytique ou quasi-analytiques.

– Corollaire de la précédente, la résolution ne doit pas nécessiter l'introduction de simulations éléments finis dans les itérations de l'optimisation, sauf en cas d'absence totale d'alternative. Ces méthodes précises mais lourdes seront réservées à des étapes de vérification de la solution de l'optimisation, éventuellement pour recalculer un modèle simplifié et relancer une deuxième optimisation au voisinage de la première solution.

– Les modèles et paramètres utilisés doivent être représentatifs de l'état de l'art industriel et des limitations qui en découlent (discrétisation des données). Ils doivent être adaptatifs aux évolutions technologiques.

Ces modèles devront ensuite être intégrés dans des procédures d'optimisation locales (optimiser le composant) ou globales (optimiser l'ensemble des composants qui constituent le convertisseur). Dans une optique classique d'optimisation sous contraintes, l'algorithme d'optimisation devra minimiser une fonction "objectif" en respectant un ensemble de contraintes "égalité" ou "inégalité". Une fois les modèles mis en place, il est a priori possible d'intégrer n'importe lequel des paramètres évoqués, à l'exception des spécifications, soit dans la fonction objectif soit dans le vecteur des contraintes.

Tableau 1. Principaux éléments devant intervenir dans les modèles considérés

	COMPOSANTS MAGNÉTIQUES	CONDENSATEURS	COMPOSANTS À SEMI-CONDUCTEURS
SPÉCIFICATIONS SYSTÈME ⁽¹⁾	v, i, P (transformateurs) ou W (inductances, $1/2Li^2$), F	v, i, W ($1/2Cv^2$), F	v, i, F
SPÉCIFICATIONS MATÉRIAUX	<p>Matériaux magnétiques : Perméabilité Induction à saturation Modèles de pertes fer Matériaux conducteurs Conductivité électrique Matériaux isolants Permittivité Champ de rupture</p>	<p>Matériaux diélectriques : Permittivité Champ électrique de rupture Modèles de pertes diélectriques Matériaux conducteurs (électrodes) Conductivité électrique</p>	<p>Les composants à semi-conducteurs constituent une classe à part. Ils sont "surfaciés" et n'ont donc pas de volume intrinsèque significatif. C'est leur système de refroidissement qui générera les relations géométrie-température. L'aspect matériaux ne sera pas exploité dans la démarche proposée.</p>
	<i>Pour tous les matériaux : coefficients de température des paramètres et conductivité thermique</i>		
VARIABLES INTERNES	<p>Densités de courant et formulations de pertes joule AC. Composantes d'induction continues et alternatives. Pertes fer et perte joule. Inductances magnétisantes Inductances de fuite</p>	<p>Densités de courant et formulations de pertes joule AC. Composantes de champ électrique continues et alternatives. Pertes diélectriques</p>	<p>Chutes de tension en conduction surfaciées. Capacités parasites surfaciées. Charge de grille surfaciée. Energies de commutation. Pertes en conduction et en commutation</p>

⁽¹⁾ Les variables électriques apparaissent ici sous une forme qui se veut complètement générale. Selon les cas, des valeurs crêtes, des valeurs moyennes, des valeurs efficaces, des décompositions harmoniques seront nécessaires.

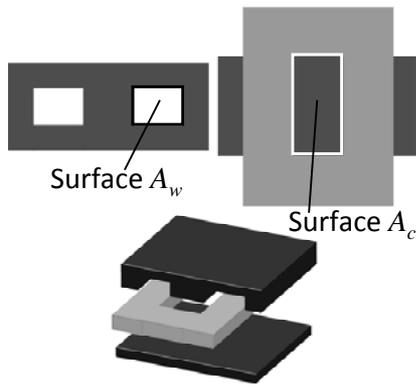
3. Modèles des composants de puissance

3.1 Composants magnétiques

Comme nous l'avons évoqué dans l'introduction, l'objectif est ici de concevoir complètement le composant en intervenant sur ses différents constituants, noyaux magnétiques, conducteurs et isolants.

3.1.1 Modèle

Pour présenter le principe de modélisation, il est commode de s'appuyer sur le "célèbre" produit des aires dont les expressions générales sont les suivantes pour des composants à q enroulements :



$$Cte.(Vol)^{4/3} = A_w A_c = P \frac{\sum_{i=1}^q K_{Pi} \frac{K_{wi}}{J_{iRMS}(T, F, A_w)}}{B_M(T, F, A_c) F}$$

$$Cte.(Vol)^{4/3} = A_w A_c = W_L \frac{\sum_{i=1}^q K_{WLi} \frac{K_{wi}}{J_{iRMS}(T, F, A_w)}}{B_M(T, F, A_c) F}$$

Figure 2 : Dimensions pour un composant de type "planar"

ou:

- A_w , fenêtre disponible pour les conducteurs (grandeur dimensionnelle)
- A_c , section effective du circuit magnétique (grandeur dimensionnelle)
- P , puissance dans le cas des transformateurs ou coupleurs (spécification système)
- W_L , énergie dans le cas des inductances (spécification système)
- T , température de fonctionnement (contrainte principale)
- F , fréquence de fonctionnement (spécification système)
- B_M , valeur crête de l'induction dans le circuit magnétique (variable interne)
- J_{iRMS} , densité de courant efficace dans l'enroulement i (variable interne)
- K_{Pi} et K_{wi} , facteurs dépendants de la géométrie et de la forme de l'excitation électrique
- K_{wi} , facteurs de remplissage de la fenêtre de bobinage (forme des conducteurs, isolement)

L'induction maximale et les densités de courant sont dépendantes de la fréquence, des dimensions et sont en particulier limitées, à travers les pertes fer et les pertes joule, par la température admissible. Dans le papier final, cette partie sera détaillée, en particulier en ce qui concerne les modèles de pertes nécessaires à description complète du composant. On montrera que, tout en prenant en compte des modèles assez fins de ces pertes (effet de peau 1D, formulation empirique large bande des pertes fer), la résolution peut rester analytique dans de nombreux cas et que les expressions ci-dessus traduisent la possibilité d'appliquer l'approche résumée par la Figure 1.

Il sera également montré comment les données industrielles sont exploitées pour rendre cette approche réaliste (pertes fer, forme des circuits magnétiques, techniques de réalisation des conducteurs).

3.1.2 Limites/parties manquantes

L'approche proposée, si elle est efficace (cf. paragraphe suivant), a évidemment quelques limites :

- Elle bloque sur les situations qui rendent difficile ou impossible la modélisation électromagnétique 1D nécessaire à l'estimation des pertes joule et éventuellement, les inductances de fuite. Ceci concerne principalement les inductances, en particulier dans les zones d'entrefer, mais également les têtes de bobinage dans différentes configurations. Ceci sera développé dans le papier final.

- Elle est construite dans une logique de composants basse tension, pour lesquels on peut utiliser des isolants standards. L'occupation de ces isolants est assez mal décrite, elle doit être prise en compte par les facteurs K_{wi} . Pour les transformateurs haute tension, dans lesquels la part d'isolants est considérable, cette approche doit être affinée.

- Le modèle thermique actuellement mis en place est rudimentaire et ne peut donner qu'une température de surface supposée homogène à partir du choix d'un coefficient d'échange. Il devra être amélioré pour prendre en compte l'inévitable hétérogénéité thermique.

3.1.3 Exemples d'application

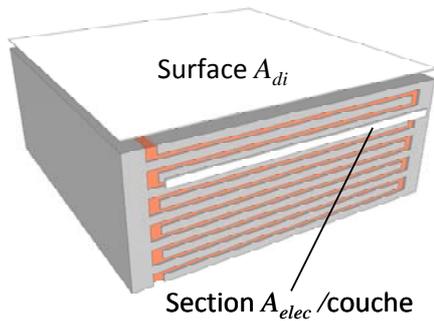
Le papier final présentera des exemples de prototypes réalisés à partir de cette méthode de conception, transformateurs HF, coupleurs isolés et non isolés.

3.2 Condensateurs

L'objectif est ici de construire un modèle qui permette de définir et de faire varier les paramètres d'un condensateur théorique mais représentatif de ce qu'il sera ensuite possible de trouver dans la production standard. Ce modèle devra être adapté en fonction des trois principales technologies disponibles, condensateurs chimiques, à films plastiques et céramiques.

3.2.1 Modèle

Le cheminement utilisé pour les composants magnétiques peut être repris ici et donne la forme générale suivante :



$$\begin{aligned} Cte.(Vol)^{4/3} &= A_{elec} A_{di} \\ &= W_C \frac{K_{WC} K_{elec}}{J_{RMS}(T,F,A_{elec}) \varepsilon E_M(T,F,e) F} \end{aligned}$$

Figure 3 : Dimensions pour un condensateur type céramique multi-couches

ou:

- A_{di} , surface développée du diélectrique assimilée à la surface du condensateur (grandeur dimensionnelle)
- A_{elec} , section totale des électrodes (grandeur dimensionnelle)
- e , épaisseur du diélectrique (grandeur dimensionnelle)
- W_C , énergie stockée (spécification système)
- T , température de fonctionnement (contrainte principale)
- F , fréquence de fonctionnement (spécification système)
- E_M , valeur crête du champ électrique dans le diélectrique (variable interne)
- J_{RMS} , densité de courant efficace dans les électrodes (variable interne)
- K_{pi} et K_{wi} , facteurs dépendants de la géométrie et de la forme de l'excitation électrique
- K_{wb} , facteurs de remplissage de la fenêtre de bobinage (forme des conducteurs, isolement)

Cette description est applicable à des formes parallélépipédiques ou cylindriques. A nouveau, la forme générale proposée montre que le problème peut être formulé conformément à la Figure 1, à condition de disposer de modèles de pertes. Les résultats de différents travaux de modélisation sont disponibles dans la littérature et constituent une base solide pour traiter le cas des condensateurs à films plastiques et des condensateurs céramiques. L'étude des condensateurs électrochimiques, avec leur structure particulière d'électrodes "dendritiques" oxydées, nécessite des aménagements. Le papier final présentera la mise en place de ces modèles, qui est en cours. Il sera montré comment ces modèles sont confrontés aux données contenues dans une base construite par nos soins et rassemblant les caractéristiques de quelques milliers de référence de condensateurs.

3.2.2 Limites/parties manquantes

Comme dans le cas précédent, cette approche à ses limites ou nécessite encore des développements :

- Les modèles sont censés représenter la réalité industrielle. Cette dernière est complexe avec de nombreux fabricants, une grande diversité de variantes technologiques et de "secrets" de fabrication. Ces modèles ne pourront être représentatifs que d'une moyenne dans une technologie donnée.

- Le modèle thermique reste à développer, l'objectif étant de parvenir à une identification des points chauds. A nouveau, cette partie s'inspirera de travaux existants qui nécessitent une résolution numérique et que l'on essaiera de simplifier. Cette approche devrait être ensuite applicable aux composants magnétiques.

3.2.3 Exemples d'application

Dans la mesure où ces composants sont finalement choisis "sur étagère", on ne peut montrer un exemple de conception. Quelques confrontations de résultats théoriques à des caractéristiques de condensateurs réels de mêmes spécifications seront proposées.

3.3 Composants à semi-conducteurs

Une autre soumission proposée par le même "collectif" abordera largement la problématique des modèles d'aide à la conception dans le cas des composants à semi-conducteur, en particulier sur le volet "pertes par commutation". Dans le présent papier, cette partie "semi-conducteur" sera donc minoritaire et présentera simplement quelques orientations.

3.3.1 Modèle

L'aspect qui sera développé dans le papier final concernera uniquement les pertes par conduction. Il sera montré comment une base de données regroupant la majeure partie de la production industrielle de Mosfet a été utilisée pour élaborer un modèle empirique continu de la résistance à l'état passant surfacique en fonction de la tension et de la température, à partir d'une population des meilleurs individus de la base.

3.3.2 Limites/parties manquantes

Comme il a déjà été indiqué, la représentation des pertes par commutations sera traitée dans une autre soumission qui soulèvera les nombreuses difficultés auxquelles est confrontée la construction des modèles destinés à la conception, du fait de cette composante de pertes.

Une autre limitation propre à cette catégorie est la gestion de la discrétisation de l'offre dans un processus de conception, et cette question sera abordée dans le papier final.

4. Références

Ces références seront mise à jour et complétées dans l'article final.

- [1] R. Petkov, "Optimum Design of High-Power High Frequency Transformer, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol 11, N° 1, pp. 33-42, January 1996.
- [2] G. Hurley, W. H. Wölfle, J. G. Breslin, "Optimized Transformer Design : Inclusive of High Frequency effects, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol 13, N° 4, pp. 651-659, July 1998.
- [3] J. T. Strydom, J. D. Van Wyk, "Electromagnetic Design Optimization Tool for Resonant Integrated Spiral Planar Power Passives (ISP³), IEEE Transactions on Power Electronics, Vol 20, N° 4, pp. 743-753, July 2005.
- [4] H. Njiende, N. Fröhleke, J. Böcker, "Optimized Size Design of Integrated Magnetic Component Using Area Product Approach, CD-ROM of EPE Conferences, 10p, Dresden, 2005.
- [5] P. Dowell, "Effects of Eddy Currents in Transformer Windings", IEE Proceedings, Vol 113, pp. 1387-1394, August 1966.
- [6] J. A. Ferreira, "Improved Analytical Modeling of Conductive Losses in magnetics Components", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol 9, N° 1, pp. 127-131, January 1994.
- [7] M. Sippola, E. Sepponen, "Accurate Prediction of High Frequency Power-Transformer Losses and Temperature Rise, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol 17, N° 5, pp. 835-847, September 2002
- [8] S.A. Mulder, "Fit formulae for power loss in ferrites and their use in transformer design", PCIM'93 Europe, Official Proceedings of the Twentysixth International Power Conversion Conference, pp. 345-59, 1993.
- [9] L. Jieli, T. Abdallah, C. R. Sullivan, "Improved Calculation of Core Loss with nonsinusoidal waveforms", Proceedings of Industry Applications Conference, Vol. 4, pp. 2203-2210, Sept-Oct 2001.
- [10] W. G. Odendaal, J. Ferreira, "Effects of Scaling High Frequency Transformers Parameters", IEEE Transactions on Industrial Applications, Vol 35, N° 4, pp. 932-940, July-August 1999.
- [11] W. G. Odendaal, J. Ferreira, "A Thermal Model for High-Frequency Magnetic Components", IEEE Transactions on Industrial Applications, Vol 35, N° 4, pp. 924-931, July-August 1999.
- [12] F. Forest, E. Labouré, T. Meynard, M. Arab: "Analytic Design Method Based on Homothetic Shape of Magnetic Cores for High Frequency Transformers", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 22, N°5, pp. 2070-2080, september 2007.
- [13] M. H. El-Husseini, P. Venet, G. Rojat, C. Joubert, "Thermal Simulation for Geometric Optimization of Metallized Polypropylene Film Capacitors", IEEE Transactions On Industry Applications, Vol. 38, No. 3, pp. 713-718, June 2002.
- [14] S. G. Parler S.G. "Thermal modeling of aluminum electrolytic capacitors", Industry Applications Conference, 1999. Thirty-Fourth IAS Annual Meeting. Conference Record, Vol. 4, pp. 2418-2429, October 1999.
- [15] C. Joubert "Etude des phénomènes électromagnétiques dans les condensateurs a films métallisés - nouvelle génération de condensateurs", Thèse de doctorat de l'Ecole Centrale de Lyon, 1996.