

# **Conclusion générale**



# Conclusion générale

L'objectif de ces travaux est d'apporter des outils autant théoriques que pratiques, pour la modélisation et l'optimisation de dispositifs électrotechniques, par le recours unique aux prototypes virtuels, c'est-à-dire principalement aux modèles éléments finis.

Les développements se sont concentrés sur la mise au point et l'application de stratégies d'optimisation, par l'utilisation exclusive de la méthode des plans d'expériences (MPE).

De manière plus large, les études théoriques et les exemples applicatifs ont contribué à l'établissement de fondements méthodologiques, pour l'utilisation de la MPE dans l'étude des systèmes.

Les principes théoriques de cette méthode ont été présentés dans le premier chapitre.

C'est ainsi qu'a été définie une structure en 2 volets : une approche qualitative correspondant à l'analyse de screening permettant la détermination des facteurs non influents, à laquelle succède une analyse quantitative (RSM ou optimisation par plans d'expériences) fondée sur la construction et l'analyse de surfaces de réponses.

Ces concepts ont nécessité la définition des plans d'expériences (PE), objets mathématiques à la base de la méthode éponyme. Les définitions des principaux plans d'expériences sont données dans l'annexe 1.

C'est alors qu'a été mise en avant la dualité fondamentale existant par construction entre chaque PE et le modèle qu'il permet de calculer. Cet aspect définit de fait l'intérêt de la méthode elle-même, qui réside avant tout dans l'exploration du domaine d'étude (DE). Chaque plan d'expériences permet de déduire un modèle de la réponse et donc d'explorer une zone particulière du DE.

La MPE comprend également l'usage d'outils spécialisés, principalement pour l'exploitation et la compréhension des résultats d'expériences. Ce chapitre en décrit les principaux, attachés à l'analyse de screening (ANOVA, graphiques particuliers) et à la RSM, leurs descriptions complètes étant consignées dans l'annexe 3.

Enfin, la notion d'optimalité a ensuite été introduite. Elle apparaît constituer une solution intéressante à la construction de PE lorsque des conditions particulières de construction doivent être respectées (existence de contraintes, réutilisation de résultats d'expériences déjà réalisées).

Le chapitre 2 a présenté 8 stratégies d'optimisation recourant exclusivement à la méthode des plans d'expériences. Elles ont été classées suivant la façon dont les PE ont été utilisés : il s'agit des méthodes par glissements, par zooms, et exhaustives.

Pour chacun de ces algorithmes, les points forts de la MPE ainsi que les avantages naturels des plans d'expériences ont été exploités. C'est ainsi que les travaux se sont notamment concentrés sur les récupérations d'expériences entre plans. L'annexe 2 en donne les principales configurations.

Les différents algorithmes d'optimisation décrits dans ce chapitre ont naturellement recourus aux plans de RSM, qui sont destinés aux études quantitatives en raison de leur nature. Cependant, il a été vu que les plans de screening pouvaient aussi y trouver leur place, majoritairement en raison de leurs faibles coûts et du placement intéressant de leurs points. Cette ressource a été principalement exploitée par les méthodes exhaustives.

L'étude des configurations de récupérations de points entre plans factoriels fractionnaires a ainsi permis de définir un nouveau type de plan d'expériences : le plan treillis. Celui-ci peut être utilisé pour réaliser des analyses de screening sur tout ou une partie du domaine couvert par le plan, ou bien servir à la construction de surfaces de réponse. Il constitue donc un lien entre les 2 grandes étapes constitutives de la méthode des plans d'expériences.

Le troisième chapitre décrit l'application informatique Sophemis, spécialement développée dans le cadre de cette thèse pour appliquer les développements théoriques et conceptuels vus dans les chapitres précédents.

Cette partie présente dans un premier temps l'aspect graphique de cet outil, avant d'aborder plus spécifiquement son mode de fonctionnement et ses possibilités. C'est ainsi qu'est présentée notamment l'acquisition des valeurs de réponses en chaque expérience, en particulier par la commande de programmes externes tels que OPERA®.

Les outils d'analyse, de calcul et de représentations graphiques sont ensuite présentés et illustrés.

La partie finale de ce chapitre traite alors de 2 points forts de Sophemis.

Le premier réside dans son aptitude à gérer les calculs distribués. Il est effectivement possible de répartir une charge de calcul (un plan d'expériences par exemple) entre plusieurs ordinateurs distants d'un réseau, chacun calculant une partie déterminée des expériences. Cette solution permet de diminuer considérablement les temps globaux de calculs ; elle facilite ainsi l'application de techniques d'optimisation ou le calcul de plans coûteux.

Le second atout de Sophemis tient dans la modularité complète de ses fonctions. Chaque outil de calcul, de représentation graphique ou de communication est en réalité un élément externe, à laquelle l'application proprement dite se lie pour l'utiliser. Cette structuration des données s'avère être très avantageuse, notamment concernant la mise à jour et l'ajout de fonctionnalités.

Sophemis a contribué par son existence à simplifier la réalisation des études des systèmes modélisés, en particulier dans leur optimisation. Son principe de fonctionnement totalement modulaire en fait une base d'implémentation et de tests pour de nouvelles méthodes d'optimisation, pas nécessairement à base de plans d'expériences...

Le quatrième et dernier chapitre met à profit l'existence de Sophemis pour le traitement des optimisations de 3 dispositifs électrotechniques : un moteur synchrone à aimants, un système de stockage d'énergie magnétique par anneaux supraconducteurs et un frein linéaire à courants de Foucault.

Ces 3 exemples d'applications mettent en œuvre certaines stratégies d'optimisation présentées au deuxième chapitre. Ils s'inscrivent dans des contextes d'analyse à chaque fois différents.

Ainsi dans le premier cas, sont définis des facteurs continus, discrets et qualitatifs. L'accent est mis ici sur l'analyse de screening, par la réalisation de plusieurs plans. Une étude quantitative est alors menée (RSM et optimisation) pour chaque combinaison des modalités des facteurs qualitatifs.

Le deuxième exemple est un problème d'optimisation discret, mettant en jeu une contrainte en valeurs atteintes. Le calcul de l'analyse de variance se révèle ici problématique. Concernant la démarche d'optimisation, 2 approches ont été employées : l'une procède à une simplification en écartant un facteur de la définition du problème, l'autre applique une modélisation globale de la fonction objectif dans l'ensemble du DE pour les 3 facteurs définis.

Enfin, le dernier exemple présente les études menées pour la caractérisation, la modélisation et l'optimisation d'un frein linéaire à courants de Foucault, utilisé dans le domaine ferroviaire. Ces travaux ont été réalisés en partenariat avec la société Alstom-Transport. Deux modélisations du dispositif ont été utilisées : l'une 2D et l'autre volumique. Les résultats présentés montrent ainsi notamment les limites de représentativité, constatées sur l'utilisation du modèle éléments finis 2D par comparaison avec une étude tridimensionnelle. Celle-ci est validée par des résultats expérimentaux. Des surfaces de réponses et un modèle optimisé sont présentés, celui-ci réalisant un bon compromis entre une force de freinage maximale et une force d'attraction minimale.



Les travaux de cette thèse s'inscrivent dans un cadre d'étude bien défini. Bien évidemment, certains points connexes n'ont pu y être traités. Nous en citons quelques-uns ci-après, qui pourraient ainsi constituer le thème de développements futurs.

Les stratégies d'optimisation présentées dans le second chapitre utilisent de façon exclusive la méthode des plans d'expériences. Des développements ultérieurs pourraient s'attacher à étudier des stratégies hybrides, c'est-à-dire mêlant l'usage des PE avec l'application d'autres méthodes heuristiques déterministes ou stochastiques.

De façon plus fondamentale, peut aussi être abordée la difficulté résidant dans la définition de toute étude de systèmes (électrotechniques notamment). Il arrive en effet que la détermination et la spécification initiales des données soient revues pour être corrigées en cours de l'étude d'un dispositif, soit par l'ajout d'un facteur ou par la modification de la définition du DE... Ces mises au points successives

compromettent la pertinence et donc la qualité des analyses menées. Il s'agit d'un problème difficile, assurément sans solution simple et générale, mais auquel l'application de méthodologies préalablement réfléchies pourrait constituer un début de réponse.

Lors des problèmes d'optimisation, il est courant de devoir améliorer dans le même temps les valeurs de plusieurs réponses. Cela a été illustré dans l'étude du frein linéaire à courants de Foucault présentée au chapitre 4, dans laquelle la maximisation de la force freinage et la minimisation de la force d'attraction constituaient les objectifs. De là, il apparaît que l'usage des techniques de prise en compte des objectifs multiples mériterait d'être davantage étendu, afin notamment de procurer des outils fiables pour la résolution des optimisations multi-objectifs.

Enfin, la prise en compte des variables de bruit, notamment à l'origine des erreurs expérimentales, doit être poursuivie et développée. Cela permettra d'appliquer pleinement les notions impliqués par les analyses de variances, et également d'aborder le traitement du concept de robustesse d'un état (de la détermination d'une solution optimale par exemple) vis-à-vis de ces composantes de bruit.

Bien que les exemples présentés dans le dernier chapitre soient propres à l'électrotechnique, les stratégies d'optimisation par plans d'expériences décrites ici peuvent parfaitement être appliquées à d'autres domaines, par exemple pour l'étude des réseaux électriques, de circuits en électronique de puissance, ou encore de commandes de dispositifs.