



**HAL**  
open science

**Contribution à l'intégration de la modélisation et la  
simulation multi-physique pour conception des systèmes  
mécatroniques,**  
Moncef Hammadi

► **To cite this version:**

Moncef Hammadi. Contribution à l'intégration de la modélisation et la simulation multi-physique pour conception des systèmes mécatroniques,. Autre. Ecole Centrale Paris; École nationale d'ingénieurs de Sfax (Tunisie), 2012. Français. NNT : 2012ECAP0003 . tel-00711469

**HAL Id: tel-00711469**

**<https://theses.hal.science/tel-00711469>**

Submitted on 25 Jun 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.

**Thèse de doctorat**

**Présentée par**

**Moncef HAMMADI**

Pour l'obtention du grade  
de Docteur de l'École Centrale Paris

Spécialité : Génie Industriel

Laboratoire d'accueil : **LISMMA – SUPMECA Paris**

**Contribution à l'intégration de la modélisation  
et la simulation multi-physique pour la  
conception des systèmes mécatroniques**

Soutenue le 12 janvier 2012 devant un jury composé de :

**M. Mohamed ICHCHOU (PU, ECL)**  
**M. Claude MARCHAND (PU, SUPELEC)**  
**M. Lotfi ROMDHANE (PU, ENI-SOUSSE)**  
**M. Pierre LEFRANC (MdC, SUPELEC)**  
**M. Jamel LOUATI (PU, ENI-SFAX)**  
**M. Hubert KADIMA (Direct. Rech. EISTI)**  
**Mme. Olivia PENAS (Ing.Rech, SUPMECA)**  
**M. Jean-Yves CHOLEY (MdC, SUPMECA)**  
**M. Mohamed HADDAR (PU, ENI-SFAX)**  
**M. Alain RIVIERE (PU, SUPMECA)**

**Président**  
**Rapporteur**  
**Rapporteur**  
**Examineur**  
**Examineur**  
**Invité**  
**Co-encadrant**  
**Encadrant**  
**Co-directeur**  
**Directeur**

# Dédicaces

à ma famille

## DÉDICACES

---

# Remerciements

Je remercie très fortement Messieurs Alain RIVIERE et Mohamed HADDAR, les directeurs respectifs de l'Institut Supérieur de Mécanique de Paris (SUPMECA) et l'Unité de Mécanique, Modélisation et Productique (U2MP) à l'École Nationale d'Ingénieurs de Sfax (ENIS), pour avoir accepté de co-diriger cette thèse, pour leur confiance, leur soutien, leurs qualités scientifiques et humaines et avoir toujours veillé à ce que ma thèse se déroule dans les meilleures conditions.

Mes remerciements s'adressent également à Monsieur Jean-Yves CHOLEY, directeur de Laboratoire d'Ingénierie des Systèmes Mécaniques et des MATériaux (LISMMA) à SUPMECA et co-encadrant de cette thèse, pour m'avoir accueilli dans son laboratoire, pour le suivi et les conseils scientifiques tout au long de ces trois années.

Je tiens à remercier aussi Monsieur Jamel LOUATI, professeur des universités à l'ENIS, pour avoir accepté de co-encadrer ce travail, je lui exprime ici toute ma gratitude pour son soutien et son encouragement.

Je souhaiterais également exprimer ma gratitude et ma reconnaissance à Madame Olivia PENAS, ingénieur de recherche à SUPMECA, pour le temps qu'elle a passé pour les relectures minutieuses du manuscrit, pour ses remarques et ses conseils scientifiques.

J'exprime mes profonds remerciements à Monsieur Mohamed ICHCHOU, professeur des universités à l'École Centrale de Lyon, qui m'a fait l'honneur d'accepter de présider le Jury de ma soutenance.

Mes remerciements s'adressent aussi à Monsieur Lotfi ROMDHANE, professeur des universités à l'École Nationale d'Ingénieurs de Sousse et Monsieur Claude MARCHAND, professeur des universités à l'Université Paris Sud, pour avoir accepté

## REMERCIEMENTS

---

d'être les rapporteurs de cette thèse. Je les remercie pour leurs remarques et commentaires scientifiques.

J'adresse également mes remerciements à Monsieur Hubert KADIMA, professeur des universités à l'École Internationale des Sciences du Traitement de l'Information (EISTI), pour avoir accepté d'être parmi les membres du jury pour l'évaluation de ce travail.

Je manifeste également mes remerciements à Monsieur Pierre LEFRANC, maître de conférences à l'École Supérieure d'Électricité (SUPELEC), pour avoir accepté d'examiner ce travail. Je le remercie aussi pour les idées échangées durant les réunions du projet Outils de Modélisation Mécatronique (O2M).

J'aimerais aussi remercier mes collègues Régis Plateaux et Faïda MHENNI, enseignants-chercheurs à SUPMECA, pour les échanges d'idées scientifiques, qui ont contribué à la construction de ce travail. J'adresse aussi mes remerciements à tous les membres du laboratoire LISMMA qui ont participé de près ou de loin au bon déroulement de mes travaux de thèse, et en particulier Madame Christel COMPAGNON, assistante du directeur du laboratoire LISMMA.

Mes remerciements s'adressent également à mes parents, mes frères et mes sœurs pour leur encouragement et leur soutien continu. Sans oublier tous les amis et les collègues, qui m'ont encouragé durant ces années de thèse.

Enfin, je remercie mon épouse Wided qui a tenu seule durant ces dernières années.

# Résumé

Le verrou de l'intégration de la simulation multi-physique dans la conception des systèmes mécatroniques est lié, entre autres, aux problèmes d'interopérabilité entre les outils de simulation. Ces problèmes engendrent des difficultés pour assurer des optimisations multidisciplinaires. Dans cette thèse, nous avons développé une approche de conception intégrée permettant de franchir cet obstacle. Cette approche s'appuie sur l'utilisation d'une plateforme d'intégration permettant de coupler divers outils de modélisation et de simulation. La modélisation du comportement multi-physique des composants au niveau détaillé est assurée par les méta-modèles, également utilisés pour l'optimisation multidisciplinaire des composants du système mécatronique. Ces méta-modèles permettent aussi d'intégrer le comportement multi-physique des composants et des modules mécatroniques pour la simulation au niveau système. Cette approche a été validée avec une modélisation d'un véhicule électrique. Ainsi, le niveau conceptuel de modélisation a été effectué avec le langage de modélisation des systèmes SysML et la vérification d'un test de performance d'accélération a été réalisée avec le langage de modélisation Modelica. Le module de conversion de puissance électrique du véhicule avec les fils de bonding a été modélisé avec la CAO 3D et son comportement multi-physique a été vérifié avec la méthode des éléments finis. Des méta-modèles sont ainsi élaborés en utilisant les techniques de surfaces de réponse et les réseaux de neurones de fonctions à base radiale. Ces méta-modèles ont permis ensuite d'effectuer des optimisations géométriques bi-niveaux du convertisseur de puissance et des fils de bonding. Le comportement électro-thermique du convertisseur de puissance et celui thermo-mécanique des fils de bonding ont été alors intégrés au niveau système à travers les méta-modèles. Les résultats montrent la flexibilité de l'approche du point de vue échange des méta-modèles et optimisation multidisciplinaire. Cette approche permet ainsi un gain très important du temps de conception, tout en respectant la précision souhaitée.

**Mots-clés :** Mécatronique ; simulation multi-physique ; optimisation multidisciplinaire ; méta-modélisation ; surfaces de réponse ; réseaux de neurones RBF ;

# Abstract

Difficulty of integrating multi-physics simulation in mechatronic system design is related, among others, to issues of interoperability between design tools, which lead to difficulties to ensure multidisciplinary optimizations. In this thesis, we have developed an integrated design approach to overcome this obstacle. This approach relies on the use of integrating platforms for coupling various design tools. Capture of multi-physics behavior of components at detailed level is provided by meta-models which are also used for multidisciplinary optimization. These meta-models are therefore used to integrate multi-physics behavior of mechatronic components and modules in system-level simulations. This approach has been validated with a design case of an electric vehicle. Conceptual design level has been performed with the Systems Modeling Language SysML and a verification of an acceleration performance test has been achieved with modeling language Modelica. Electric power converter with wire bondings has been modeled using 3D CAD and the multi-physics behavior has been verified with finite elements method. Meta-models have then been developed for the power converter and wire bondings using techniques of response surfaces and neuronal networks of radial basis functions. These meta-models have been used to perform geometric bi-level optimizations of the components. Electro-thermal behavior of the power converter and thermo-mechanical behavior of the wire bondings have been integrated at system level through meta-models. Results show flexibility of the approach used in terms of exchange of meta-models and multidisciplinary optimization. Thus, this approach allows an important gain of design time while maintaining the desired accuracy.

**Key words :** Mechatronics ; multi-physics simulation ; multi-disciplinary optimization ; meta-modeling ; response surface ; neural networks of Radial Basis Functions (RBF) ;

# Table des matières

Dédicaces . . . . .	i
Remerciements . . . . .	iii
Résumé . . . . .	v
Abstract . . . . .	vi
Table des matières . . . . .	vii
Table des figures . . . . .	xi
Liste des tableaux . . . . .	xiii
<b>Contexte de recherche</b>	<b>1</b>
<b>Introduction Générale</b>	<b>3</b>
1 Problématique de la thèse . . . . .	3
2 Objectifs de cette thèse . . . . .	6
3 Organisation du mémoire . . . . .	7
<b>1 État de l’art et enjeux de la conception mécatronique</b>	<b>9</b>
1 Introduction . . . . .	9
2 Définitions liées à la mécatronique . . . . .	9
3 La mécatronique automobile . . . . .	11
3.1 Conception au niveau système en automobile . . . . .	13
3.1.1 Les configurations d’un véhicule électrique . . . . .	13
3.1.2 Analyse des performances d’un véhicule électrique . . . . .	16
3.2 Conception au niveau des sous-systèmes mécatroniques . . . . .	17
3.3 Conception au niveau détaillé . . . . .	19
4 Enjeux de la conception mécatronique . . . . .	22
4.1 Les techniques de modélisation et de simulation . . . . .	22
4.2 Les outils de modélisation et de simulation . . . . .	23
4.3 Les méthodes de conception . . . . .	30
4.4 La problématique d’interopérabilité . . . . .	36
4.5 Optimisation des systèmes mécatroniques . . . . .	38

TABLE DES MATIÈRES

---

5	Conclusion . . . . .	39
<b>2</b>	<b>Méthodologie de conception intégrée pour la mécanique</b>	<b>41</b>
1	Introduction . . . . .	41
2	Les niveaux d'abstraction et la méta-modélisation . . . . .	41
3	La méta-modélisation par approximation . . . . .	47
3.1	Plans d'expériences . . . . .	50
3.1.1	Plans factoriels . . . . .	51
3.1.2	Plans Latin Hypercube . . . . .	51
3.2	Méthodes d'approximation . . . . .	53
3.2.1	Régression polynômiale . . . . .	53
3.2.2	Réseau de neurones de fonctions à base radiale . . . . .	53
3.2.3	Krigeage . . . . .	55
4	Proposition d'une approche de conception mécanique . . . . .	56
4.1	La préconception . . . . .	62
4.2	La conception préliminaire . . . . .	63
4.3	La conception détaillée . . . . .	64
4.4	Proposition d'une plateforme logicielle de conception intégrée . . . . .	66
5	L'optimisation multi-disciplinaire avec l'approche proposée . . . . .	69
6	Conclusion . . . . .	70
<b>3</b>	<b>Validation de l'approche retenue</b>	<b>73</b>
1	Introduction . . . . .	73
2	Modélisation conceptuelle d'un véhicule électrique . . . . .	75
3	Modélisation physique préliminaire du système véhicule électrique . . . . .	76
4	Modélisation physique au niveau détaillé . . . . .	82
4.1	Élaboration d'un méta-modèle optimal pour le convertisseur de puissance . . . . .	83
4.1.1	Construction d'un méta-modèle géométrique pour le convertisseur de puissance . . . . .	85
4.1.2	Optimisation géométrique sous contraintes multi-physiques du convertisseur de puissance . . . . .	89
4.1.3	Construction d'un méta-modèle pour les températures . . . . .	90
4.2	Élaboration d'un méta-modèle optimal pour un fil de bonding . . . . .	94
4.2.1	Construction d'un méta-modèle géométrique pour le fil de bonding . . . . .	94
4.2.2	Optimisation géométrique du fil de bonding . . . . .	97
4.2.3	Construction d'un méta-modèle pour la contrainte de Von-Mises . . . . .	99

4.3	Optimisation géométrique bi-niveau . . . . .	102
4.4	Intégration des méta-modèles dans Modelica . . . . .	103
5	Méta-modélisation au niveau système . . . . .	105
5.1	Élaboration des méta-modèles . . . . .	105
5.2	Optimisation au niveau système sur les méta-modèles . . . . .	105
5.3	Intégration des méta-modèles au niveau SysML . . . . .	107
6	Conclusion . . . . .	108
	<b>Conclusion générale et perspectives</b>	<b>111</b>
	<b>Glossaire</b>	<b>117</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>121</b>

TABLE DES MATIÈRES

---

# Table des figures

1.1	<i>L'électronique dans un véhicule automobile moderne [CANTOR et al. 08]</i>	11
1.2	<i>Schéma conceptuel d'un véhicule électrique moderne [EHSANI et al. 09]</i>	14
1.3	<i>Configurations possibles d'un VE : (a) transmission conventionnelle avec une boîte de vitesse multi-rapports de réduction et un embrayage, (b) transmission avec variation continue de vitesse, (c) réducteur et différentiel intégrés, (d) deux moteurs séparés avec leurs réducteurs, (e) transmission directe avec deux moteurs et réducteurs intégrés, (f) deux moteurs séparés dans les roues [EHSANI et al. 09]</i>	15
1.4	<i>Une motorisation d'un VHE [TADROS et al. 03]</i>	18
1.5	<i>Modélisation électrique d'un onduleur avec une machine électrique</i>	20
1.6	<i>Coupe schématique d'un module de puissance avec refroidissement faces avant et arrière [TOO 10]</i>	20
1.7	<i>Connexions par fils de bonding [TOO 10]</i>	21
1.8	<i>Les diagrammes SysML<sup>1</sup></i>	25
1.9	<i>Étude comparative entre divers outils de simulation([EJJABRAOUI 10])</i>	26
1.10	<i>Modélisation d'un circuit électrique avec Bond-Graphs : a) schéma électrique et b) schéma Bond-Graph équivalent</i>	27
1.11	<i>Comparaison des cycles de vie selon INCOSE [HASKINS 06]</i>	32
1.12	<i>Le cycle en V (source INCOSE [HASKINS 06])</i>	34
1.13	<i>Le cycle en spirale ([BOEHM 88])</i>	35
2.1	<i>Les niveaux d'abstraction de modélisation (OMG)</i>	42
2.2	<i>Principe de réduction des modèles EF [BECHTOLD 05]</i>	46
2.3	<i>Un plan factoriel complet (n=2, m=4)</i>	51
2.4	<i>Plan Latin Hypercube (n=2, m=10) : a) Classic et b) Optimal</i>	52
2.5	<i>Réseau de neurones de fonctions à base radiale</i>	54
2.6	<i>Cycle en V de conception mécatronique</i>	58

---

1. <http://www.umlsysml.org/sysml>

TABLE DES FIGURES

---

2.7	<i>Cycle de conception en spirale</i> . . . . .	59
2.8	<i>Processus itératif d'apprentissage [BOX &amp; DRAPER 07]</i> . . . . .	60
2.9	<i>Système mécatronique à trois sous-systèmes</i> . . . . .	62
2.10	<i>Exemple de plateforme de conception mécatronique</i> . . . . .	66
3.1	<i>Schéma conceptuel d'un véhicule électrique</i> . . . . .	74
3.2	<i>Les principales variables physiques à modéliser et les liens entre elles</i>	74
3.3	<i>Processus adopté pour la validation de l'approche</i> . . . . .	75
3.4	<i>Architecture physique au niveau préconception (méta-modélisation avec SysML)</i> . . . . .	75
3.5	<i>Modélisation du véhicule électrique avec Dymola (Modelica)</i> . . . . .	76
3.6	<i>Le système de contrôle du véhicule</i> . . . . .	77
3.7	<i>Modélisation de la transmission sous Dymola (Modelica)</i> . . . . .	79
3.8	<i>Vitesse du véhicule électrique</i> . . . . .	81
3.9	<i>Résultats de simulation</i> . . . . .	82
3.10	<i>Shémas du convertisseur de puissance : a) schéma 3D et b) schéma 2D, répartition des transistors et diodes.</i> . . . . .	83
3.11	<i>Section des différentes couches du module de puissance</i> . . . . .	84
3.12	<i>Conductivité thermique du silicium en fonction de la température</i> . . . . .	85
3.13	<i>Analyse thermique par éléments finis</i> . . . . .	85
3.14	<i>Validation du modèle RBF</i> . . . . .	87
3.15	<i>Surfaces de réponse du modèle RBF : a) Surface <math>A_r</math>, b) température <math>T_3</math> et c) température <math>T_9</math></i> . . . . .	88
3.16	<i>Validation des surfaces de réponse de <math>T_3</math> et <math>T_9</math></i> . . . . .	93
3.17	<i>Surfaces de réponse des températures : a) <math>T_3</math> et b) <math>T_9</math></i> . . . . .	93
3.18	<i>a) Connexion des puces par les fils de bonding; b) Paramètres géométriques du fil de bonding</i> . . . . .	94
3.19	<i>Etude des bondings</i> . . . . .	95
3.20	<i>Validation des SRs élaborées avec RBF pour le fil de bonding</i> . . . . .	98
3.21	<i>Les surfaces de réponse physiques du fil de bonding</i> . . . . .	99
3.22	<i>Validation de la surface de réponse pour la contrainte de Von-Mises</i> . . . . .	101
3.23	<i>Optimisation géométrique bi-niveau avec iSIGHT</i> . . . . .	102
3.24	<i>Intégration des surfaces de réponse au niveau système</i> . . . . .	104
3.25	<i>Variation des températures et de la contrainte de Von-Mises après intégration au niveau système</i> . . . . .	104
3.26	<i>Quelques surfaces de réponse pour la vitesse <math>V_{100}</math> et le courant <math>I_a</math></i> . . . . .	106

# Liste des tableaux

1.1	<i>Quelques ordres de grandeur de températures dans un véhicule automobile . . . . .</i>	13
2.1	<i>Quelques fonctions à base radiale . . . . .</i>	55
2.2	<i>Niveaux de conception . . . . .</i>	59
3.1	<i>Paramètres de simulation . . . . .</i>	80
3.2	<i>Caractéristiques du module de puissance . . . . .</i>	84
3.3	<i>Résultats du DOE et évaluation des fonctions de sortie pour le convertisseur de puissance . . . . .</i>	86
3.4	<i>Analyse des erreurs, comparaison entre RBF et RPQ . . . . .</i>	87
3.5	<i>Résultats d'optimisation géométrique avec SR et directe . . . . .</i>	89
3.6	<i>Résultats du DOE et évaluation des températures <math>T_3</math> et <math>T_9</math> . . . . .</i>	91
3.7	<i>Analyse des erreurs sur les températures <math>T_3</math> et <math>T_9</math>, comparaison entre RBF et RPQ . . . . .</i>	92
3.8	<i>Termes des polynômes <math>T_3</math> et <math>T_9</math> . . . . .</i>	92
3.9	<i>Résultats du DOE et évaluation de 3 variables (<math>M</math>, <math>\sigma_e</math> et <math>Fr</math>) par EF pour le fil de bonding . . . . .</i>	96
3.10	<i>Évaluation des erreurs des surfaces de réponse . . . . .</i>	97
3.11	<i>Comparaison entre l'optimisation avec SR et celle avec la méthode directe pour le fil de bonding . . . . .</i>	97
3.12	<i>Élaboration et validation des méta-modèles pour la contrainte de Von-Mises . . . . .</i>	100
3.13	<i>Modèle polynômial de la contrainte de Von-Mises . . . . .</i>	101
3.14	<i>Comparaison entre l'optimisation avec le méta-modèle RBF et le modèle Dymola du véhicule électrique . . . . .</i>	107

LISTE DES TABLEAUX

---

# Contexte de recherche

Ces travaux de recherche ont été réalisés dans le cadre d'une thèse en cotutelle entre les deux écoles doctorales : l'École Centrale Paris (ECP) et l'ENIS-Tunisie et ils ont été accomplis au LISMMA à l'SUPMECA et à l'U2MP à l'ENIS.

Les travaux de cette thèse ont été, en partie, menés dans le cadre du projet O2M du Pôle de compétitivité en recherche et développement automobile et transports publics (Mov'eo).

Le projet O2M représente un budget de 28 M€ [EMM 10] et implique 32 partenaires universitaires et industriels (SUPMECA, SUPELEC, l'École Nationale Supérieure de l'Électronique et de ses Applications (ENSEA), Valeo, Dassault Systèmes (DS), Renault, etc.).

L'objectif du projet O2M est la création d'un nouvel environnement de conception intégrée en assurant, entre autres, l'intégration de l'ingénierie système avec la modélisation multi-domaine, mais aussi l'aide au pré-dimensionnement de la Mécatronique automobile. Pour aboutir à cet objectif, un verrou principal doit être dépassé. Celui-ci correspond à des outils métiers incompatibles, des méthodes différentes et un manque de modèles multi-domaines pour la conception en Mécatronique.

O2M s'organise en huit sous-projets<sup>2</sup>. Ainsi, ces travaux font partie du sous-projet 6 (SP6) 'ELEC3D', piloté par Valeo, qui se consacre à la conception électronique 3D intégrée. Dans le SP6, il s'agit de supprimer les ruptures d'intégration entre les modélisations et simulations multi-physiques et multi-domaines comme la mécanique et l'électronique [EMM 10].

---

2. <http://www.pole-moveo.org/pdf-projets-das/O2M-A.pdf>



# Introduction Générale

## 1 Problématique de la thèse

Depuis que le terme "Mécatronique" a été introduit par un ingénieur de la société 'Yaskawa Electric' en 1969, et l'évolution des définitions données à ce terme, le développement des techniques mécatroniques a conduit à l'adoption généralisée de l'électronique pour développer des produits 'intelligents'. Ceci concerne par exemple des avions et des véhicules automobiles modernes ou bien à une échelle plus réduite, des disques durs ou des roulements instrumentés.

Dans le domaine de l'automobile, tous les constructeurs sont aujourd'hui devant un challenge qui est la réconciliation entre le besoin de mobilité et les exigences de l'environnement. En effet, devant une augmentation continue du parc des véhicules dans le monde et des exigences de réduction du taux de  $CO_2$  dans l'environnement, les constructeurs doivent trouver des solutions efficaces qui satisfassent ces demandes. Une solution intéressante approuvée par les constructeurs d'automobile consiste à favoriser l'intégration de l'électronique dans les véhicules. Ainsi, les véhicules modernes sont de plus en plus équipés de modules mécatroniques, qui améliorent la performance et la sécurité tels que les systèmes de direction assistée, "l'Anti-Blocking System (ABS)", "l'Electronic Stability Program (ESP)" ou le système d'aide à la conduite. Pour l'environnement, les constructeurs ont accordé une importance particulière pour le développement des véhicules hybrides et électriques.

La mécatronique vise ainsi à mettre en place des techniques adaptées pour le processus de développement des systèmes mécatroniques. La démarche classique de conception multi-disciplinaire se base sur une méthode séquentielle qui impose de mettre en place la structure mécanique pour lui ajuster, par la suite, la partie commande. Or cette dernière méthode n'est plus appropriée pour assurer une synergie entre les disciplines de la mécatronique (mécanique, électronique et informatique temps réel). En effet, une collaboration est nécessaire entre les différents acteurs,

au plus tôt, pour mieux maîtriser les problèmes d'interfaces entre les sous-systèmes. D'autres concepts, tels que le cycle en V et le cycle en spirale, sont ainsi adoptés pour favoriser la conception collaborative. Mais, ces concepts ne fournissent aucune méthode qui permette de résoudre le problème de communication entre les outils de conception ou l'optimisation multi-disciplinaire du système.

Par ailleurs, dans le processus de conception mécatronique, la modélisation et la simulation numérique ont une place importante pour la vérification et la validation de la conception. Néanmoins, ces deux tâches sont d'une difficulté particulière si on traite la conception des systèmes mécatroniques. Tout d'abord, la mécatronique fait intervenir différents domaines et par conséquent des méthodes de modélisation différentes. Le domaine de l'électronique inclut de l'analogique et du numérique comme il inclut les processus continus et événementiels. Le domaine de la mécanique est concerné par la modélisation géométrique 3D et le comportement cinématique et dynamique des mécanismes. Ensuite, l'intégration entre la mécanique et l'électronique a pour conséquence de faire interagir des phénomènes physiques différents et par conséquent des couplages entre : structure, fluide, électrique, thermique, électromagnétique, vibratoire, etc. Un effort supplémentaire est donc nécessaire pour identifier les grandeurs physiques communes aux phénomènes couplés et modéliser ces interactions pour pouvoir résoudre le problème et simuler le comportement du système.

La simulation multi-physique en mécatronique peut être effectuée à deux niveaux de conception, au niveau du système et au niveau des composants. En conception préliminaire, la simulation multi-physique est généralement effectuée au niveau système en utilisant des outils informatiques basés sur des langages de modélisation multi-domaine tels que Modelica<sup>3</sup> et VHSIC Hardware Description Language (VHDL)-Analog Mixed Signal (AMS)<sup>4</sup> ou des logiciels multi-domaines tels que Simulink<sup>5</sup>, AMESim<sup>6</sup> et Simplorer<sup>7</sup>. Bien qu'ils soient à vocation multi-domaine, ces outils sont plus ou moins optimisés pour des domaines que pour des autres. Ainsi, pour la modélisation des systèmes de contrôle, Simulink prend une place en tête par rapport aux autres. Par contre, pour la simulation des circuits analogiques ou numériques en électronique, VHDL-AMS est mieux placé. Ainsi, des communications entre ces différents outils informatiques sont nécessaires, que se soit

---

3. <http://www.openmodelica.org/>

4. Very High Speed Integrated Circuits (VHSIC)

5. <http://www.mathworks.fr/products/simulink/>

6. <http://www.lmsintl.com/>

7. <http://www.ansoft.com/products/em/simplorer/>

pour l'échange des modèles ou pour la co-simulation.

En conception détaillée, la simulation multi-physique est également nécessaire pour vérifier une géométrie ou une interaction entre une géométrie et des phénomènes multi-physiques. Les techniques de simulation se basent essentiellement sur des méthodes utilisant la technique de maillages telles que la Méthode d'Éléments Finis (MEF), la Méthode des Différences Finies (MDF) ou la Méthode des Volumes Finis (MVF). Les outils de simulation multi-physique en conception détaillée peuvent être classés en deux types. Des logiciels généralistes tels que les logiciels de calcul par Éléments Finis (EF) Ansys<sup>8</sup>, Comsol<sup>9</sup> et Abaqus<sup>10</sup>, ou des logiciels spécialisés pour certaines physiques tels que le logiciel Ansys/Maxwell<sup>11</sup> pour la simulation électromagnétique. Pour certains problèmes multi-physiques, ces différents logiciels nécessitent également de communiquer entre eux par échange de modèles ou pour la co-simulation.

Vu le coût élevé du calcul, les outils de simulation employés au niveau de la conception détaillée ne sont pas adaptés pour la simulation multi-physique au niveau système. À l'inverse, les outils de simulation multi-domaine ne sont pas adaptés pour la vérification des phénomènes multi-physiques couplés avec une géométrie complexe. Or pour la validation finale de la conception, il est nécessaire de vérifier le système mécatronique après la phase de la conception détaillée. Ainsi, un échange de modèles entre le niveau de conception détaillée des composants et le niveau de modélisation système est nécessaire.

Par ailleurs, le problème d'interopérabilité entre les outils de modélisation et de simulation mécatronique concerne également l'échange des données entre le niveau conceptuel (analyse des besoins et modélisation fonctionnelle) et les autres niveaux de conception. Ceci permet de comparer les critères d'évaluation, qui sont définis au début de la conception, avec les résultats obtenus par la simulation multi-physique. Par conséquent, le choix d'une méthodologie de simulation multi-physique doit se faire en tenant compte du problème d'interopérabilité entre les différents outils de modélisation et les différents niveaux de conception. Ainsi, une analyse multi-physique compatible avec une démarche d'Ingénierie Système (IS) pourrait être une solution adéquate au problème d'interopérabilité.

L'optimisation est une phase importante dans tout processus de conception et en particulier l'optimisation multi-disciplinaire en mécatronique. En effet, l'optimisation multi-disciplinaire permet aux concepteurs d'incorporer les effets de chacune

---

8. <http://www.ansys.com>

9. <http://www.comsol.com/>

10. <http://www.simulia.com/products/abaqus>

11. <http://www.ansoft.com/products/em/maxwell/>

des disciplines en même temps. L'optimum global ainsi trouvé doit être meilleur que les configurations trouvées en optimisant chaque discipline à part. C'est à ce niveau qu'apparaît l'importance de l'intégration synergique entre les disciplines de la mécatronique. Cependant le problème d'optimisation multi-disciplinaire est plus compliqué et il entraîne souvent un surcoût au niveau du temps de calcul.

Enfin, proposer une approche de simulation multi-physique, à la fois compatible avec une démarche d'ingénierie système et assurant une optimisation multi-disciplinaire, est un grand challenge pour les concepteurs, pour augmenter la valeur ajoutée de l'intégration multi-disciplinaire des systèmes mécatroniques.

## 2 Objectifs de cette thèse

L'objectif de cette thèse est de proposer une méthode destinée à intégrer la modélisation et la simulation multi-physique pour la conception des systèmes mécatroniques. Tout d'abord, cette méthode doit être compatible avec les activités de conception des systèmes mécatroniques basées sur des approches d'ingénierie système pour permettre de répondre aux besoins d'interopérabilité et du travail collaboratif et surtout d'assurer une traçabilité entre la vérification des exigences et la simulation multi-physique. Ensuite, cette méthode doit répondre aux besoins d'optimisation multi-disciplinaire, pour trouver l'optimum global dans un ensemble des contraintes multi-physiques et multi-disciplinaires. Enfin, cette approche doit également offrir la possibilité d'entreprendre une démarche itérative permettant d'exploiter les retours d'expériences des simulations multi-physiques en réintégrant les évolutions correspondantes aux modèles.

Après avoir situé la problématique, nous présentons maintenant une solution qui permettra de répondre à ces besoins.

La phase d'exploration des solutions possibles nous a permis d'étudier une première alternative qui consiste à l'utilisation de l'une des techniques de réduction de modèles telle que la Proper Orthogonal Decomposition (POD). Cette solution permet de transformer un problème physique d'un ordre élevé en un problème équivalent d'ordre réduit tout en conservant un niveau acceptable de précision. Les modèles réduits peuvent ainsi être intégrés dans un logiciel de simulation multi-domaine pour une vérification du système global. L'avantage de la méthode de réduction des modèles est la possibilité d'étudier les phénomènes transitoires avec une précision acceptable. Certains phénomènes transitoires, tels que le comportement électro-thermique des convertisseurs de puissance, nécessitent l'emploi de cette technique. Le deuxième

avantage est l'échange facile du modèle réduit entre plusieurs outils de simulation, ce qui résout en grande partie le problème d'interopérabilité. Pourtant, les inconvénients de cette méthode sont nombreux. Tout d'abord, il est difficile d'appliquer cette approche pour un problème multi-physique couplé ou non-linéaire. Ensuite, la méthode de réduction des modèles n'est pas adaptée aux problèmes d'optimisation multi-disciplinaire. En effet l'optimisation géométrique, par exemple, ne peut pas être facilement traitée avec cette méthode, car pour chaque configuration géométrique il est nécessaire de générer un modèle réduit.

D'où le choix de la deuxième alternative qui est la méta-modélisation par approximation pour élaborer des modèles multi-physiques des composants d'un système mécatronique à partir des simulations avec des codes de haute précision. Les méta-modèles élaborés sont intégrables pour des analyses au niveau système avec des outils de simulation multi-domaine. Cette méthode est intégrée dans un processus de conception qui est effectué suivant une démarche d'ingénierie système. La démarche est itérative et évolue suivant des étapes de conception de plus en plus détaillées. Le retour d'expérience se concrétise par des modèles approximés créés à partir des processus de simulation qui peuvent être réintégrés dans la modélisation du système global pour favoriser l'évolution et la maturité de la conception. A chaque étape de conception, des processus de simulation peuvent être définis avec un ou plusieurs outils de simulation. Les modèles approximés construits sont utilisés comme support pour l'optimisation multi-disciplinaire, ce qui permet de résoudre le problème des calculs coûteux. Vu leur simplicité mathématique, les méta-modèles peuvent être facilement intégrés dans des outils de simulation multi-domaine ou des outils d'ingénierie système ce qui permet une interopérabilité entre les différents niveaux de conception.

### 3 Organisation du mémoire

Pour répondre à ces objectifs, le manuscrit de cette thèse s'organise de la manière suivante :

- Dans le premier chapitre, nous dressons un état de l'art de la conception mécatronique dans lequel nous présentons quelques définitions du terme mécatronique ainsi qu'une présentation du cas de la mécatronique automobile. Nous montrons, dans ce cas, à travers les étapes de conception les verrous rencontrés pour assurer l'intégration de la conception automobile et particulièrement les difficultés pour mener des simulations multi-physiques. Ce cas particulier nous a permis de voir de plus près les enjeux liés à la conception mécatronique en s'intéressant à quatre facteurs que sont les **méthodes** et les **outils** de concep-

tion d'une part et les problématiques d'**interopérabilité** et d'**optimisation** multi-disciplinaire d'autre part.

- Ensuite, dans le deuxième chapitre, consacré à la méthodologie de conception intégrée pour la mécatronique, nous commençons par une présentation générale des niveaux d'abstraction et de la méta-modélisation. Puis, nous détaillons le cas particuliers de la méta-modélisation par approximation, pour finir par la présentation de notre approche de conception mécatronique.
- L'approche adoptée est validée, dans le troisième chapitre, par une application à un cas de modélisation d'un véhicule électrique. Ainsi une modélisation et des simulations de niveau système avec Modelica sont présentées. Puis des applications de la technique de méta-modélisation par approximation pour l'optimisation géométrique sous-contraintes multi-physiques du convertisseur de puissance et des fils de bonding sont détaillées. Les modèles approximatifs sont réintégrés au niveau système pour une nouvelle validation.
- Ce mémoire termine avec des conclusions qui rappellent les objectifs de la thèse et les résultats proposés ainsi que des perspectives qui montrent les limites de l'approche et les améliorations qui peuvent être apportées.

# Chapitre 1

## État de l'art et enjeux de la conception mécatronique

### 1 Introduction

L'intégration de la conception mécatronique est un objectif recherché par tous les industriels de ce domaine. Dans le domaine de l'automobile en particulier, les constructeurs cherchent un bon compromis entre le besoin pour le véhicule et les exigences de l'environnement. D'où la nécessité de donner plus d'intelligence aux composants mécaniques, en intégrant plus d'électronique. Pourtant, plusieurs complexités doivent être identifiées pour assurer cette intégration.

### 2 Définitions liées à la mécatronique

La définition de la mécatronique n'a cessé d'évoluer depuis la première utilisation de ce mot par un ingénieur de la compagnie Japonaise Yaskawa Electric Corporation [BISHOP & RAMASUBRAMANIAN 02]. La définition qui a été donnée par cette compagnie plus tard est [KYURA & OHO 96] : « Le mot, mécatronique, se compose de 'méca' de mécanisme et 'tronique' de l'électronique. En d'autres termes, les technologies et les produits développés incorporeront de plus en plus l'électronique aux mécanismes, étroitement et organiquement, de manière à rendre impossible de dire où commence l'une et où se termine l'autre. »

Par ailleurs, d'autres définitions ont été proposées pour la mécatronique :

- « L'intégration synergique de l'ingénierie mécanique, avec l'électronique et le contrôle intelligent pour la conception et la fabrication des produits industriels et des processus. »[HARASHIMA *et al.* 96]

- « Une méthode utilisée pour la conception optimale des produits électromécaniques. » [SHETTY & KOLK 97]
- « L'intégration synergique des systèmes physiques, capteurs, actionneurs, électronique, contrôle et des ordinateurs à travers, et dès le début, du processus de conception permettant ainsi une prise de décision complexe. » [CRAIG 09]

La norme Française a donné sa première définition à la mécatronique en novembre 2008 (NF E 01-010) : « C'est une démarche visant l'intégration en synergie de la mécanique, l'électronique, l'automatique et l'informatique dans la conception et la fabrication d'un produit en vue d'augmenter et/ou d'optimiser sa fonctionnalité. »

Un système mécatronique n'est pas seulement un mariage de systèmes électriques et mécaniques et il est plus qu'un simple système de contrôle, c'est une intégration complète de tous [BOLTON 99].

Une vingtaine de définitions [COLOSTATE 11] tentent de mettre un accent légèrement différent sur le thème central de l'intégration des disciplines de base de la mécatronique.

Une classification des systèmes mécatroniques selon leurs caractéristiques comportementales a été proposée par [RZEVSKI 03] :

- système automatisé,
- système mécatronique 'intelligent',
- système mécatronique en réseau.

Un système automatisé est caractérisé par un système de régulation qui lui permet de s'adapter aux changements prévisibles de son environnement de façon préprogrammée. Une machine d'usinage à commande numérique classique est un exemple de système automatisé.

Un système mécatronique intelligent se diffère d'un système automatisé par sa capacité d'atteindre des objectifs donnés dans des conditions d'incertitude de manière imprévisible. Il est doué d'une flexibilité de régulation qui le rend capable de répondre à des fréquents changements dans son environnement sans être reprogrammé. Le système de transport personnel Segway (ou Gyropode) est un exemple de système mécatronique intelligent, il est équipé d'un système de stabilisation gyroscopique qui permet de réguler le système malgré les changements imprévisibles dans son environnement.

Un système mécatronique en réseau est un système composé d'agents intelligents concurrents en vue de la réalisation des objectifs du système. Une voiture moderne est un système mécatronique en réseau. En effet, les différentes unités mécatroniques constituant la voiture communiquent entre elles à travers un bus pour coordonner leurs tâches.

### 3 La mécatronique automobile

L'automobile moderne s'appuie fortement sur les systèmes électroniques avancés pour réduire les émissions polluantes et la consommation des carburants. D'autre part, pour améliorer des fonctions telles que la performance et la sécurité, l'automobile intègre des modules comme le système d'injection de carburant, le freinage antidérapant, la suspension active et le contrôle électronique de la transmission [CANTOR *et al.* 08] (voir figure 1.1).

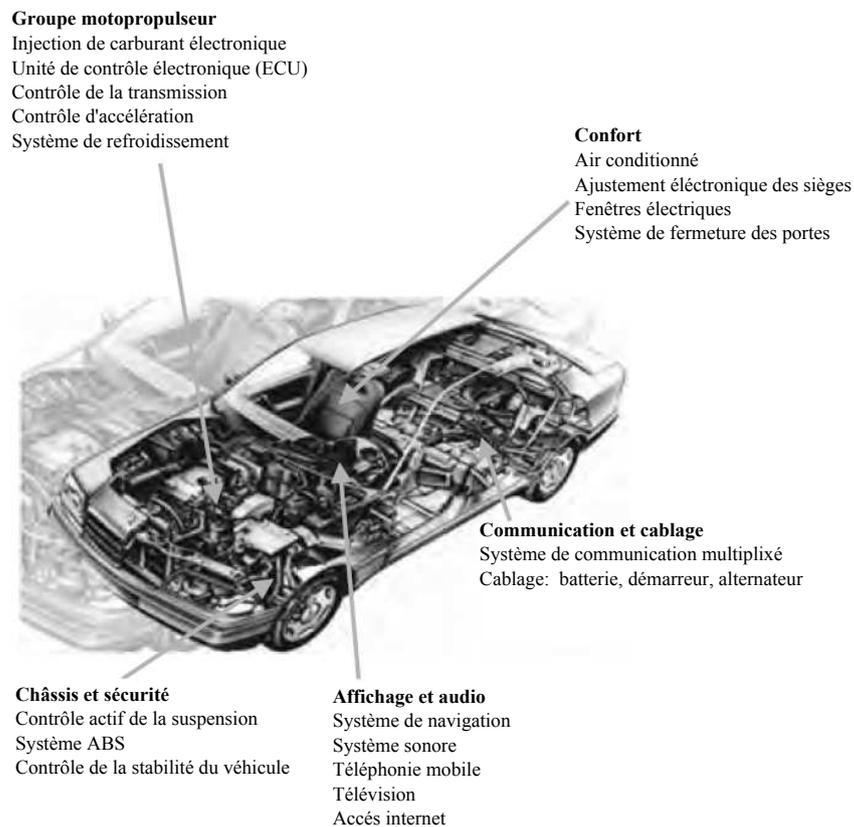


FIGURE 1.1 – *L'électronique dans un véhicule automobile moderne* [CANTOR *et al.* 08]

Dans une étude effectuée par le groupe Freedonia<sup>1</sup>, le coût moyen de l'électronique dans une automobile est passé de 1208 U.S \$ en 1999 à 1864 U.S \$ en

1. <http://www.freedoniagroup.com/>

2009 [CANTOR *et al.* 08]. Vu l'intérêt accordé au développement des Véhicules Électriques (VE) et des Véhicules Hybrides Électriques (VHE), qui sont considérés comme des solutions efficaces aux problèmes liés à l'environnement et à l'épuisement des ressources d'hydrocarbures, l'emploi de l'électronique de puissance et de signal dans l'automobile est prévu d'augmenter davantage les prochaines années.

L'usage croissant de l'électronique en automobile a mis les constructeurs automobiles devant deux choix.

Le premier est le développement d'un système électronique complexe capable de supporter un grand nombre d'entrées et des sorties en temps réel ; une solution qui est difficile à mettre en place, étant donné le grand nombre de composants électroniques à ajouter et les câblages associés dans un espace limité.

Une deuxième solution, plus intéressante, est la délocalisation des fonctions du véhicule en les associant à des "modules mécatroniques". Ces modules "intelligents" sont dotés d'actionneurs associés à des calculateurs et des capteurs intégrés. Les modules communiquent entre eux dans l'ensemble du système véhicule à travers un bus de communication (par exemple : Computer Area Network (CAN)). Une telle solution réduit, d'une part, la complexité des algorithmes de contrôle en la distribuant sur plusieurs calculateurs suivant les tâches à accomplir. D'autre part, cette architecture réduit le volume utilisé dans le véhicule en minimisant le nombre de réseaux de câblage et le nombre de connecteurs nécessaires. D'où à priori une réduction du poids, du coût, des problèmes de Compatibilité Électro-Magnétique (CEM) et par conséquent une amélioration de la fiabilité du véhicule.

Malgré les avantages que présente la deuxième solution, certains modules mécatroniques vont se trouver dans des lieux chauds tels que le moteur, la transmission, voire à côté des freins pour les systèmes de freinage "brake-by-wire". Le tableau 1.1 donne un ordre de grandeur des températures dans les zones potentielles dans un véhicule moderne. En plus des températures, les modules mécatroniques de l'automobile doivent faire face au taux élevé de vibrations et aux chocs qui sont en lien direct avec la fiabilité du véhicule. Par conséquent, des contraintes supplémentaires de conception sont à surmonter pour assurer l'intégration physique des modules électroniques dans les systèmes mécaniques.

Les concepteurs doivent tenir compte de ces contraintes aux différents niveaux de conception : niveau système, niveau sous-système et niveau composants.

Pour illustrer ces différents niveaux de conception, nous présentons, dans la section suivante, le processus général de conception en automobile. Ceci nous permettra

<b>Zone mécatronique chaude</b>	<b>Température ( ° C)</b>
Sur le moteur	150 à 200
Dans la transmission	150 à 200
Sur les roues (ABS, etc)	150 à 250
Contrôle de la pression des cylindres-moteur	200 à 300
Contrôle des gaz d'échappement	plus de 850

TABLE 1.1 – *Quelques ordres de grandeur de températures dans un véhicule automobile*

de synthétiser, par la suite, les enjeux liés à la conception mécatronique d'une manière générale.

### 3.1 Conception au niveau système en automobile

L'exploration des configurations possibles pour un véhicule automobile est l'un des principaux objectifs de la conception au niveau système du véhicule. Cette phase d'exploration est effectuée dans un haut niveau d'abstraction de conception : le niveau conceptuel (conceptual design). Cette notion sera détaillée au paragraphe 4.3, mais à ce niveau, on peut la considérer comme une phase d'analyse fonctionnelle et de recherche des solutions.

Les concepteurs définissent les bonnes métriques d'évaluation pour retenir les configurations adéquates avant de se lancer dans des phases de conception plus détaillées souvent coûteuses. L'analyse des performances des solutions retenues, permet de juger le degré de validité des solutions.

A titre d'exemple nous présentons l'étape d'exploration architecturale de conception d'un véhicule électrique.

#### 3.1.1 Les configurations d'un véhicule électrique

Un véhicule électrique moderne est constitué principalement de trois groupes (ou sous-ensembles). Le Groupe MotoPropulseur Électrique (GMPE), le groupe principal d'énergie et le groupe secondaire d'énergie. Un schéma conceptuel d'un véhicule électrique est donné par la figure 1.2 [EHSANI *et al.* 09].

Le GMPE est composé du calculateur principal du véhicule, le module de conversion de puissance, le moteur électrique, la transmission mécanique et les roues motrices. Le groupe principal d'énergie se compose de la source d'énergie (batterie et/ou super-capacité et/ou volant d'inertie), le module de gestion d'énergie et le module

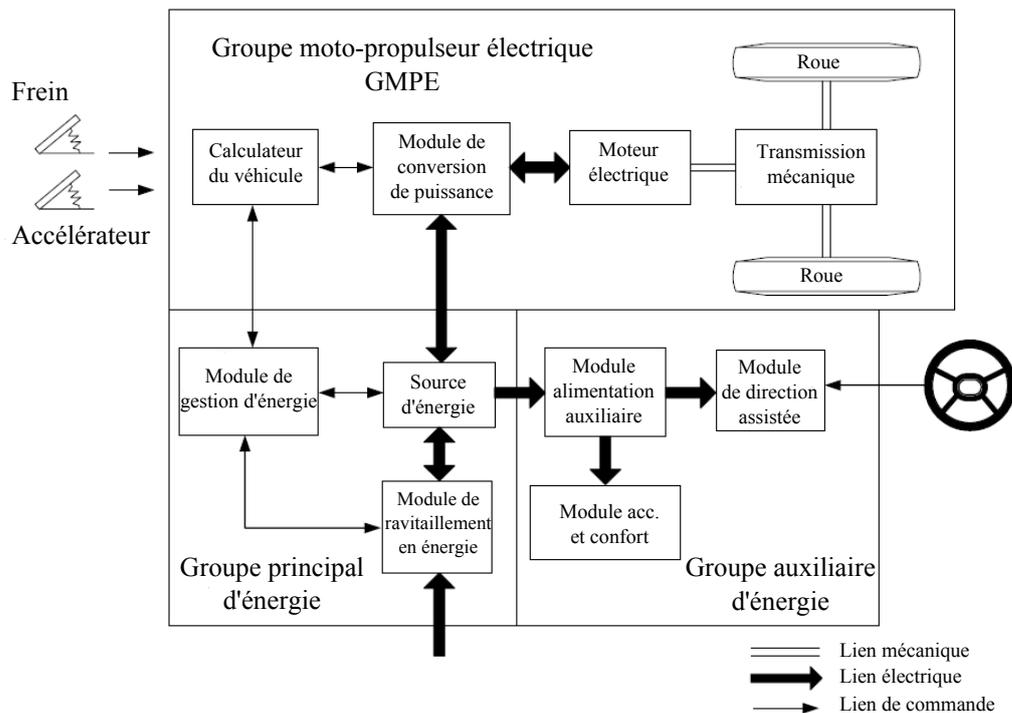
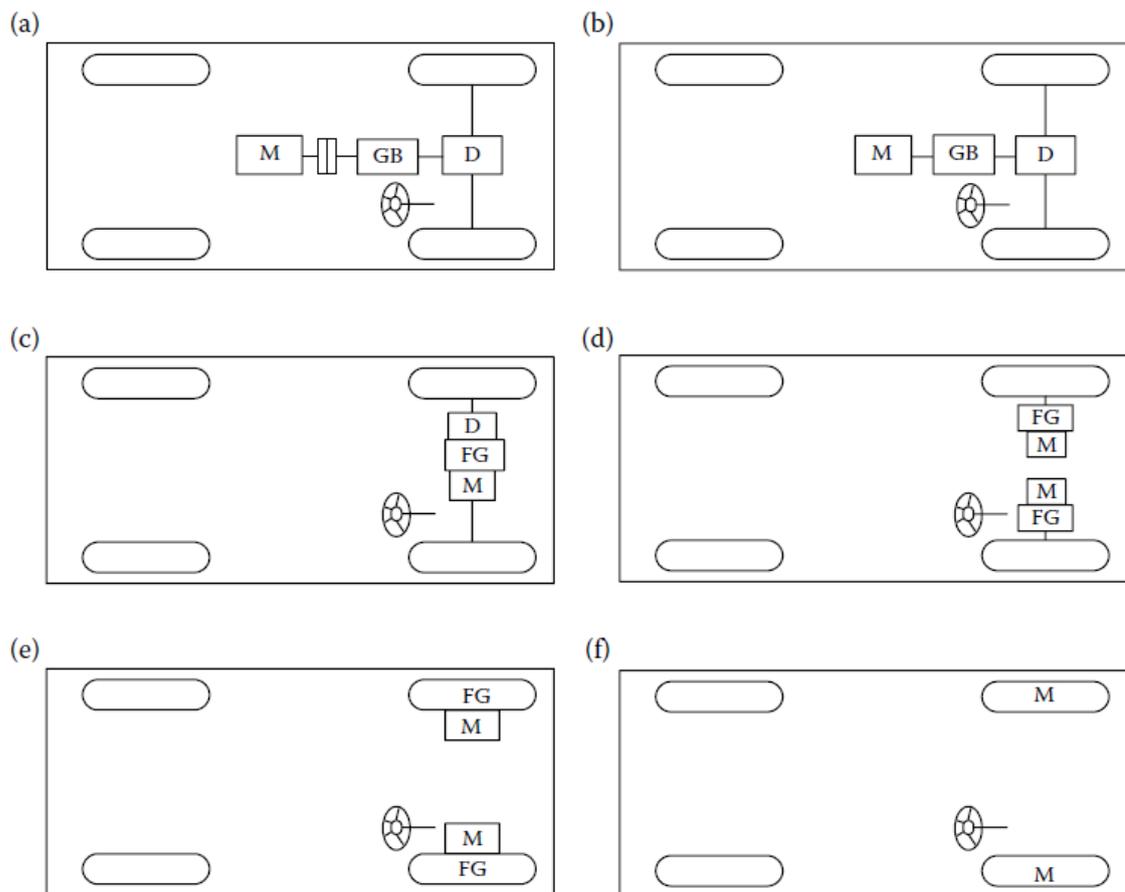


FIGURE 1.2 – Schéma conceptuel d'un véhicule électrique moderne [EHSANI et al. 09]

de ravitaillement en énergie (chargeur). Le groupe auxiliaire d'énergie est constitué du module de direction assistée, le module de gestion d'accessoires et de confort et le module d'alimentation auxiliaire.

Sur la base des signaux d'entrées des pédales d'accélérateur et du frein, le calculateur du véhicule fournit les signaux de contrôle adaptés au module de conversion de puissance, qui sert à réguler le flux de puissance entre le moteur électrique et la source d'énergie. Il est possible de restaurer une quantité d'énergie, pendant les phases de décélération et de freinage, dans la source d'énergie (freinage régénératif). La majorité des batteries, super-capacités et volants d'inertie sont capables de stocker l'énergie récupérée.

Il existe plusieurs configurations possibles pour les véhicules électriques selon les variations des sources d'énergie et les caractéristiques du système de propulsion (figure 1.3).



C: Embrayage (Clutch)

D: Différentiel

FG: Réducteur de rapport fixe

GB: Boîte de vitesse

M: Moteur électrique

FIGURE 1.3 – Configurations possibles d'un VE : (a) transmission conventionnelle avec une boîte de vitesse multi-rapports de réduction et un embrayage, (b) transmission avec variation continue de vitesse, (c) réducteur et différentiel intégrés, (d) deux moteurs séparés avec leurs réducteurs, (e) transmission directe avec deux moteurs et réducteurs intégrés, (f) deux moteurs séparés dans les roues [EHSANI et al. 09]

- a- La figure 1.3-a) montre la première configuration, dans laquelle un moteur électrique remplace le moteur de combustion d'une configuration conventionnelle. Elle est constituée du moteur électrique, un embrayage, une boîte de vitesse et d'un différentiel. L'embrayage et la boîte de vitesse peuvent être remplacés par une boîte de vitesse automatique.
- b- Avec la possibilité de réguler la vitesse du moteur électrique dans une large plage en conservant une puissance constante, il est possible de remplacer la boîte de vitesse manuelle et l'embrayage par une boîte de vitesse de rapport constant (ou réducteur). Cette solution réduit la taille et la masse de la partie mécanique de transmission. La partie commande est également simplifiée étant donnée la suppression du changement manuel du rapport de transmission.
- c- Similaire à la configuration (b), le moteur, le réducteur et le différentiel sont intégrés ce qui donne une solution plus compacte.
- d- Le différentiel est remplacé par deux moteurs électriques. Chaque moteur entraîne une roue et ils opèrent à des vitesses différentes dans les virages.
- e- Pour simplifier encore la transmission, le moteur de traction peut faire partie de la roue avec association d'un réducteur qui permet de réduire la vitesse et d'ajuster le couple de démarrage.
- f- La transmission mécanique est complètement abandonnée en intégrant le moteur dans la roue sans réducteur. Mais le moteur doit tourner à faible vitesse et un couple important doit être fourni par les moteurs au démarrage.

A la fin, de cette exploration architecturale, le concepteur doit sélectionner la (ou les) solution(s) à détailler en fonction des critères tels que la performance du véhicule.

### 3.1.2 Analyse des performances d'un véhicule électrique

Les métriques essentielles pour mesurer les performances d'un véhicule sont la vitesse maximale, l'accélération et le test de franchissement de rampe (en pente) ou "gradeability" :

- La vitesse maximale du véhicule est définie comme étant la vitesse maximale que le véhicule peut atteindre quand le moteur est en plein régime.
- La performance d'accélération est donnée par le temps d'accélération et la distance couverte, quand le véhicule part de la vitesse zéro jusqu'à une vitesse de référence donnée (par exemple de 0 à 96 *km/h* (60 *mph*) sur une route horizontale).
- La "gradeability" est définie par l'angle de la pente de route que le véhicule peut surmonter à une vitesse de référence constante. Elle peut être exprimée en degré ou en pourcentage.

Suite à l'analyse architecturale du véhicule électrique, le concepteur calcule les caractéristiques du moteur électrique et de la partie transmission mécanique tout en vérifiant les tests de performance de vitesse maximale, d'accélération et de gradeability. Pour cela, certains paramètres du véhicule doivent être déterminés au préalable ou donnés par le cahier des charges. Ces paramètres concernent la masse du véhicule, le coefficient de résistance au roulement, le coefficient de résistance aérodynamique, la surface frontale du véhicule, le rendement de la transmission mécanique. Des spécifications de performance doivent être indiquées par le cahier des charges concernant la vitesse maximale, le temps d'accélération de 0 jusqu'à une certaine vitesse de véhicule, la gradeability demandée, etc .

Toutefois, les performances du véhicule électrique ne se limitent pas aux métriques présentées ci-dessus. D'autres métriques telles que la température maximale supportée par certains composants doivent être analysées. Ce qui nécessite des analyses au niveau des sous-systèmes et des modules.

### 3.2 Conception au niveau des sous-systèmes mécatroniques

La tendance actuelle en conception automobile s'oriente vers l'utilisation des modules ou des groupes mécatroniques où la partie électronique est intégrée dans un système mécanique. Un tel sous-système est doté d'un calculateur et des capteurs lui permettant d'avoir une certaine autonomie pour assurer les tâches qui lui sont attribuées.

Toutefois, l'intégration physique de l'électronique avec la mécanique n'est pas toujours évidente. Des contraintes multi-physiques se créent et nécessitent des analyses détaillées. A ce propos, plusieurs constructeurs automobiles travaillent actuellement sur cette problématique d'intégration physique entre composants mécaniques et électroniques.

Dans un cas traité par DaimlerChrysler [TADROS *et al.* 03] pour développer une motorisation intégrée d'un Véhicule Hybride Électrique (VHE), la motorisation a été constituée d'un moteur électrique monté sur le même arbre que le moteur thermique (voir figure 1.4). Le but était d'intégrer le convertisseur de puissance et sa partie commande (le driver) dans le moteur électrique pour avoir un groupe mécatronique compact. Le module de conversion de puissance a pris une forme circulaire pour pouvoir être intégré dans le stator. Ce convertisseur est constitué de trois modules de puissance, pour pouvoir convertir le courant continu de la batterie en un courant alternatif qui alimente la machine électrique. Ces modules de puissance ont été contraints d'avoir une forme en courbe pour qu'ils puissent entrer dans l'enveloppe de ce montage. Par ailleurs, ces modules de puissance sont exposés à des températures

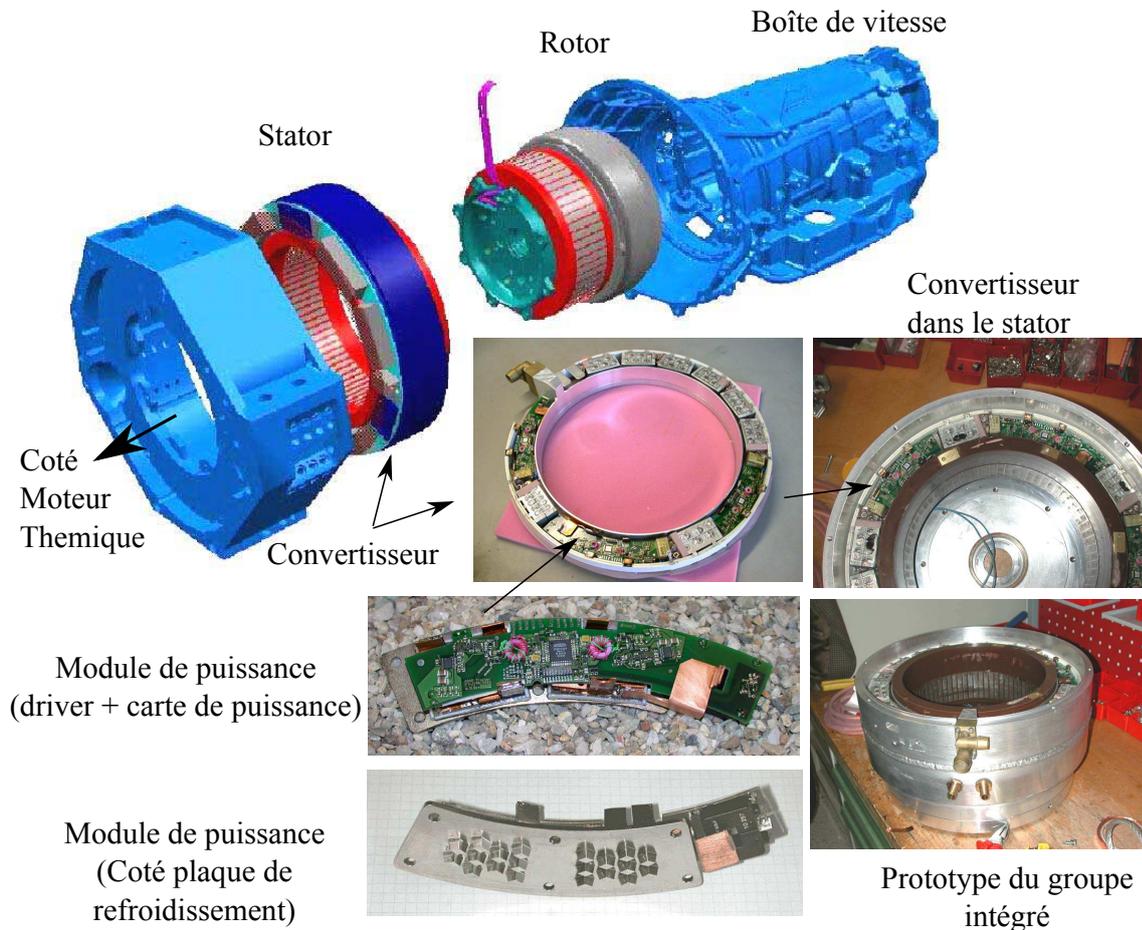


FIGURE 1.4 – Une motorisation d'un VHE [TADROS et al. 03]

élevées entre 150 et 200 °C due à la proximité du moteur thermique. Ces modules eux-mêmes sont sources d'élévation de la température puisqu'ils sont parcourus par des courants élevés atteignant 200 A, sachant que le courant lui même est influencé par la température des composants électroniques du convertisseur. D'ailleurs, un système de refroidissement a été prévu pour le convertisseur, en utilisant l'eau qui refroidit le moteur thermique et qui a une température de l'ordre de 105 °C. Avec ces contraintes, on doit aussi tenir compte du problème de la CEM due, d'une part, à la présence des cartes électroniques à côté des champs électromagnétiques provenant du moteur électrique et d'autre part, aux éléments de connexion entre les composants électroniques du convertisseur. Ceci a pour effet, non seulement, de perturber le fonctionnement du driver qui contrôle le convertisseur de puissance, mais aussi,

d'augmenter les pertes en puissance électrique dans le convertisseur, qui augmentent la température et réduisent la performance du convertisseur.

Le cas présenté ci-dessus montre les difficultés des concepteurs pour assurer l'intégration physique de l'électronique avec la mécanique pour que le groupe mécatronique fonctionne correctement avec les performances demandées.

Il faut noter que ces performances dépendent également de ce qu'il se passe au niveau des petits composants des cartes électroniques. En effet, les contraintes thermiques auxquelles sont exposés ces composants engendrent des sollicitations mécaniques et des vibrations qui peuvent réduire leur durée de vie. D'où la nécessité à des analyses aux niveaux de ces composants.

### 3.3 Conception au niveau détaillé

En descendant au niveau de conception détaillée, les tâches de modélisation sont surtout assurées par des spécialistes des disciplines du fait de leur expertise. Toutefois, ces activités de conception doivent être coordonnées entre les équipes multidisciplinaires pour assurer une conception cohérente.

La précédente présentation de la conception du groupe de motorisation intégrée du VHE de DaimlerChrysler a montré que le module de puissance doit avoir une forme en courbe pour pouvoir le loger à l'intérieur du convertisseur de puissance de forme circulaire. Ceci montre que les modules de puissances standards ne sont pas adaptés avec cette exigence. Ils doivent donc être conçus en fonction de l'encombrement disponible.

La fonction principale d'un convertisseur de puissance est la transformation de l'énergie électrique disponible en une forme appropriée pour alimenter une charge. Suivant la nature du courant dans la source et la charge, alternative (Alternative Current (AC)) ou continue (Direct Current (DC)), on distingue quatre familles de convertisseurs : les redresseurs (AC/DC), les onduleurs (DC/AC), les hacheurs (DC/DC) et les gradateurs/cyclo-convertisseurs/convertisseurs matriciels (AC/AC) [TOO 10] .

Dans le cas du véhicule électrique, un modèle électrique simple d'un onduleur triphasé qui alimente une machine électrique pourrait être schématisé par la figure 1.5.

Suivant les applications, l'onduleur triphasé peut être composé de trois modules de puissances similaires. Chaque module est constitué de puces de semi-conducteurs qui sont des Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor (MOSFET) ou In-

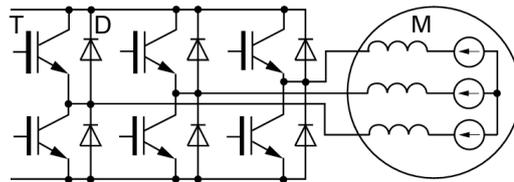


FIGURE 1.5 – Modélisation électrique d'un onduleur avec une machine électrique

sulated Gate Bipolar Transistor (IGBT) et des diodes.

La figure 1.6 montre une coupe schématique d'un module de puissance.

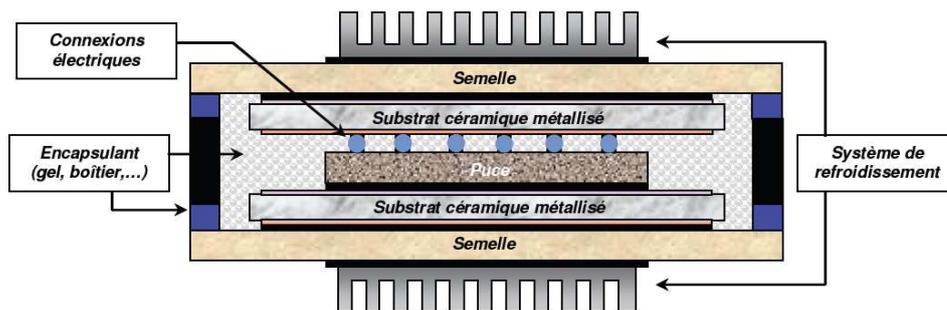


FIGURE 1.6 – Coupe schématique d'un module de puissance avec refroidissement faces avant et arrière [TOO 10]

Les transistors jouent généralement le rôle d'interrupteurs qui commutent entre ouvertures et fermetures suivant un ordre bien défini pour pouvoir convertir la puissance électrique. Les MOSFETs peuvent être employés dans les différents types de véhicules surtout pour les convertisseurs de faibles tensions (12 à 42 V). Les IGBTs sont employés surtout pour les convertisseurs à hautes tensions tels que les cas de véhicules électriques et hybrides.

D'une manière générale, un module de puissance est constitué d'une semelle (en cuivre, aluminium, carbure de silicium, etc.) sur laquelle est brasé un substrat isolant qui sert de support aux composants de puissance, l'ensemble est placé dans un encapsulant et un boîtier [TOO 10].

Les fils de bonding sont parmi les techniques utilisées pour la connexion des composants de puissance. Ces fils de sont généralement en aluminium pur avec parfois des alliages de silicium, magnésium ou nickel. Les diamètres des fils varient en fonction du courant parcouru mais ils sont dans l'intervalle 0.3 à 0.5 mm. La figure

1.7 illustre les connexions par fils de bonding dans un module de puissance. Dans le

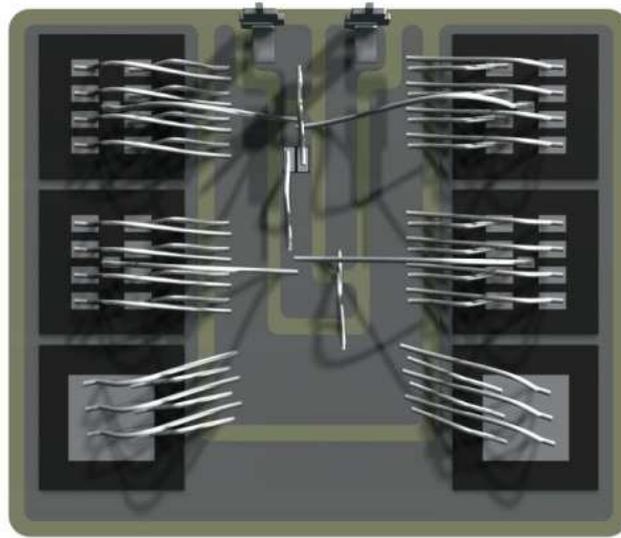


FIGURE 1.7 – *Connexions par fils de bonding [TOO 10]*

cas de la figure 1.7, les fils de bonding relient les puces de semi-conducteurs avec les pistes en cuivre. Dans d'autres configurations les puces peuvent être reliées entre-elles avec des fils de bonding.

Les fils de bonding et les pistes sont soumis à des contraintes géométriques et multi-physiques. En effet, ces éléments de connexion ont des résistances électriques, des inductances et des capacités électriques qui peuvent avoir des effets parasites sur le fonctionnement du module de puissance. Un mauvais choix de l'emplacement des puces et de la géométrie des éléments de connexion peut engendrer des surtensions, un mauvais équilibrage des courants entre les modules et des pertes importantes en puissance électrique [MARTIN *et al.* 04]. Les tests de vérification pour ces problèmes font partie des analyses CEM (par conduction ou par radiation). Par ailleurs, les éléments de connexion des convertisseurs de puissance sont également soumis aux problèmes de dégradation par vieillissement dus aux effets thermo-électriques.

Réduire les dimensions des éléments de connexion permet de réduire l'effet parasite dû à la conduction. Mais réduire trop les dimensions, rendent les éléments de connexion incapables de supporter les sollicitations thermo-mécaniques. D'autre part, la réduction des longueurs de pistes rapprochent les puces les unes aux autres ce qui favorisent les échanges des flux de chaleur et par conséquent les températures sur les puces deviennent plus élevées [MARTIN *et al.* 04]. D'où la nécessité d'une

optimisation géométrique du 'layout'<sup>2</sup> du convertisseur de puissance pour pouvoir équilibrer l'effet CEM et l'effet thermique.

Enfin, la stratégie de contrôle de commutations dans les modules de puissance joue également un rôle important pour réduire les pertes en puissance et les surtensions.

Pour conclure, l'intégration physique entre l'électronique et la mécanique, cherchée par les industriels dans le domaine de l'automobile, permet d'optimiser l'espace, la masse, le coût et les performances des véhicules modernes. Cependant, les méthodes classiques de conception ne sont plus adaptées pour assurer une conception intégrée des systèmes mécatroniques. En effet, une continuité du processus de conception doit être assurée dans : les différents niveaux de modélisation, les modèles développés, les outils utilisés ainsi que les équipes multi-disciplinaires.

## 4 Enjeux de la conception mécatronique

Le cas présenté dans la section précédente, concernant la conception mécatronique en automobile, nous a permis de voir de plus près les enjeux liés au processus de conception mécatronique. Ces enjeux concernent (voir [CABRERA *et al.* 10]) :

- la multitude des techniques et des outils de modélisation et de simulation qui peuvent être employés pour la conception mécatronique ;
- les méthodes de conception à adopter pour assurer une collaboration entre des équipes multi-disciplinaires ;
- le problème d'interopérabilité entre les outils de modélisation et de simulation ;
- et le problème de l'optimisation multi-disciplinaire des systèmes mécatroniques.

### 4.1 Les techniques de modélisation et de simulation

Pour n'importe quel système technique ou scientifique, la modélisation a pour objectif de comprendre le système et ses interactions internes et externes, et de faire des prévisions sur son comportement.

La simulation est utilisée comme une technique d'expérimentation virtuelle qui permet de substituer l'expérimentation réelle dans plusieurs situations telles que le coût (financier et temps) élevé des tests réels ou l'impossibilité d'expérimenter un système réel dans certaines configurations sans le détruire. Il est également plus simple d'accéder à l'ensemble des variables du modèle de simulation, ce qui n'est pas évident avec les systèmes réels.

---

2. Layout : disposition des composants électroniques en général.

Cependant, l'expérimentation virtuelle nécessite d'une part une modélisation valide de tout le système. D'autre part, la précision des résultats et la rapidité des simulations restent limitées par le coût de développement et de déploiement d'un modèle.

Une classification des catégories des modèles d'une manière générale a été établie par G. Pelz [PELZ 03].

Les types de modèles élaborés en modélisation mécatronique peuvent être *continus* ou *discrets*. En mécanique, les modèles sont généralement continus. En électronique, les modèles peuvent être continus, discrets ou mixtes.

La variable temps est une variable implicite pour le système à modéliser. Si les variables du modèle varient en fonction du temps, le modèle est dit "*time-variant*", dans le cas contraire il est dit "*time-invariant*".

Dans le cas de "*time-variant*", les modèles continus, se divisent en deux catégories, les modèles *évènementiels* et les modèles définis par des *équations différentielles*. Pour les phénomènes évènementiels, l'état du système varie en fonction des évènements qui peuvent avoir lieu à des instants arbitraires. Par contre, dans le cas des modèles définis par des équations différentielles, les variables du système sont continues dans le temps.

Une autre classification des modèles s'effectue suivant la nature des paramètres et variables qui peuvent être *concentrés* ou *distribués*. En mécanique par exemple, la masse peut être ponctuelle (concentrée) ou distribuée dans l'espace.

Les modèles peuvent aussi être *statiques* ou *dynamiques*. Les modèles dynamiques peuvent être en régime transitoire ou en régime permanent (équivalent au modèle statique).

Enfin, les modèles peuvent être *déterministes* ou *stochastiques*. Un modèle stochastique implique la prise en compte d'une variable aléatoire. Les autres cas de modèles sont déterministes.

La modélisation mécatronique est concernée par les différents types de modèles présentés ci-dessus. Par conséquent, ces derniers doivent être supportés par les outils de modélisation et de simulation employés en mécatronique.

## 4.2 Les outils de modélisation et de simulation

Divers langages et outils de modélisation existent actuellement sur le marché de la conception mécatronique. En grande majorité ces outils sont issus de disciplines spécifiques au départ, puis leur champ de modélisation a été étendu pour couvrir les

besoins de la conception mécatronique. Les langages et les outils les plus employés en conception mécatronique sont ainsi présentés.

**SysML :**

Systems Modeling Language (SysML)<sup>3</sup> est un langage de modélisation spécifique au domaine de l'ingénierie système. Il est issu d'une initiative d'un groupe de travail sur la modélisation des systèmes piloté par International Council on Systems Engineering (INCOSE)<sup>4</sup>, qui a abouti à le concrétiser comme étant un profil d'Unified Modeling Language (UML)<sup>5</sup>, un langage déjà très connu pour le développement des applications informatiques. SysML a été adopté par l'Object Management Group (OMG)<sup>6</sup> en 2006 comme un langage standard de modélisation d'ingénierie système. Ce langage permet de couvrir l'ensemble des phases de conception des systèmes complexes.

SysML est basé sur une approche graphique de modélisation utilisant trois catégories de diagrammes : des diagrammes pour la modélisation architecturale ou structurelle, des diagrammes pour la modélisation du comportement et des diagrammes pour la spécification des exigences. La figure 1.8 montre une organisation des diagrammes SysML avec une comparaison par rapport aux diagrammes UML.

Plusieurs travaux de recherche, ont montré les possibilités de SysML à couvrir une importante partie des activités d'ingénierie système.

A titre d'exemple, [CHRISTOPHE *et al.* 10] ont montré les capacités de SysML à intégrer des modèles de connaissance au niveau conceptuel pour le développement des produits.

Pour la spécification des exigences, SysML permet de transcrire, à partir des cahiers des charges, les exigences sous forme de blocs et de diagrammes ce qui aide à définir les concepts du système à concevoir et donne la possibilité de tracer rapidement et facilement les modèles déployés avec les exigences correspondantes.

En modélisation logique, SysML permet de définir les architectures logiques du système en organisant les exigences et les fonctions sous formes des "sous-packages" et "Packages" et de définir des diagrammes (Block Definition Diagram (BDD)) permettant de spécifier les liens d'association, de composition, d'agrégation, etc. entre les concepts. SysML permet également la vérification et la validation de ces structures logiques avec des outils de types "Statechart Diagram", "Sequence Diagram",

---

3. <http://www.sysml.org/>

4. <http://www.incose.org/>

5. <http://www.uml.org/>

6. <http://www.omg.org/>

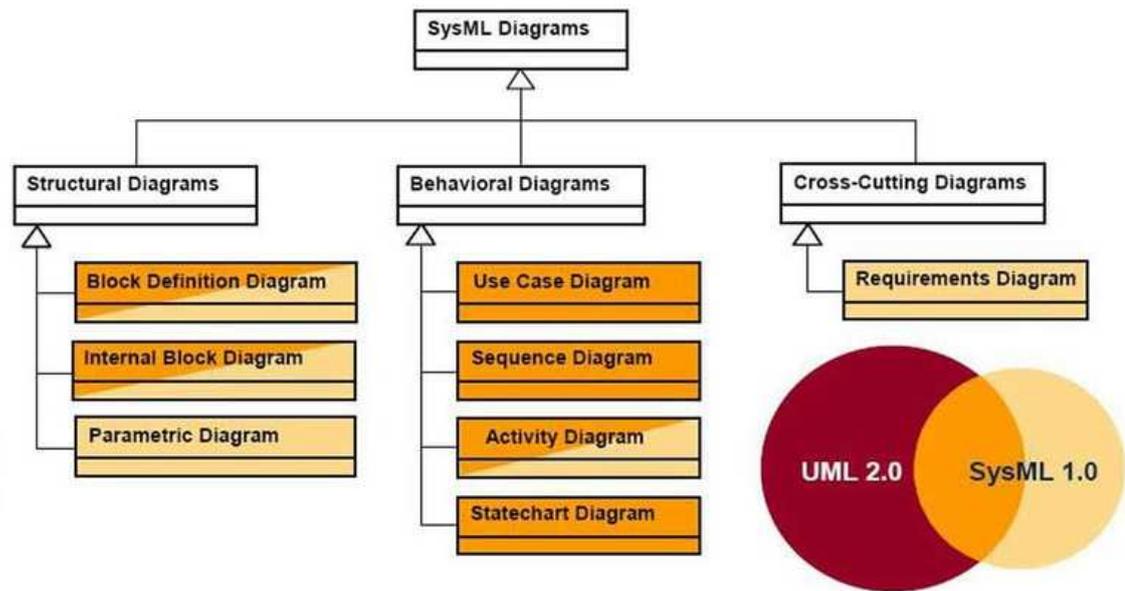


FIGURE 1.8 – Les diagrammes SysML<sup>7</sup>

"Activity Diagram" et "Use Case Diagram" ce qui permet d'appréhender le comportement du système avant de commencer sa conception au niveau détaillé.

En modélisation physique, SysML permet de définir l'architecture physique du système avec des packages et des diagrammes de types BDD et Internal Block Diagram (IBD). Il permet également de définir les lois physiques à associer aux composants et sous-systèmes en utilisant des "Parametric Diagrams" et en définissant les attributs physiques (volume, masse, etc) et les flux échangés (énergies, signaux). Par contre, SysML ne permet pas de raffiner les architectures physiques 0D avec une modélisation géométrique 2D ou 3D. Il ne permet pas également la vérification des architectures physiques par simulation pour pouvoir valider, à titre d'exemple, le comportement dynamique de la structure du système.

Pour pallier ces limitations, plusieurs auteurs ont proposé d'étendre les possibilités de SysML pour pouvoir interopérer avec d'autres langages et outils de simulation. [ANDRADE *et al.* 10] ont proposé une méthodologie pour convertir les diagrammes 'State-Machine' de SysML en des réseaux de Pétri pour pouvoir les simuler avec les outils d'analyse avec les réseaux de Pétri.

[DAVID *et al.* 10] ont présenté une démarche qui permet de générer à partir des

7. <http://www.uml-sysml.org/sysml>

blocs SysML des modèles qui peuvent être intégrés dans des outils d'Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité (AMDEC) pour analyser la performance des systèmes à concevoir.

Dans sa thèse, [TURKI 08] a proposé d'étendre SysML avec les Bond-Graphs pour pouvoir générer des modèles de Bond-Graphs dans les buts de les analyser avec des outils adéquats.

[POP *et al.* 07] ont proposé de développer le profile ModelicaML et de l'intégrer avec SysML pour pouvoir simuler les modèles SysML avec Modelica.

Les limitations de SysML pour analyser des systèmes dynamiques physiques peuvent être ainsi contournées par l'utilisation complémentaire d'autres outils de modélisation et simulation multi-domaines tels que des logiciels basés sur les langages Bond-Graph, VHDL-AMS, Modelica ou les logiciels commerciaux de types Simulink, AMESim, Simplorer, etc.

Une étude comparative a été effectuée entre une vingtaine de logiciels de simulation dans le cadre du projet O2M-SP3 (Pré-dimensionnement mécatronique). Ces outils ont été évalués suivants des critères tels que : les domaines physiques traités par chaque outil, les types de couplages multi-physiques possibles, l'ouverture de l'outil à la co-simulation, génération automatique des résultats d'évaluation, etc. Les résultats de cette étude sont donnés par la figure 1.9.

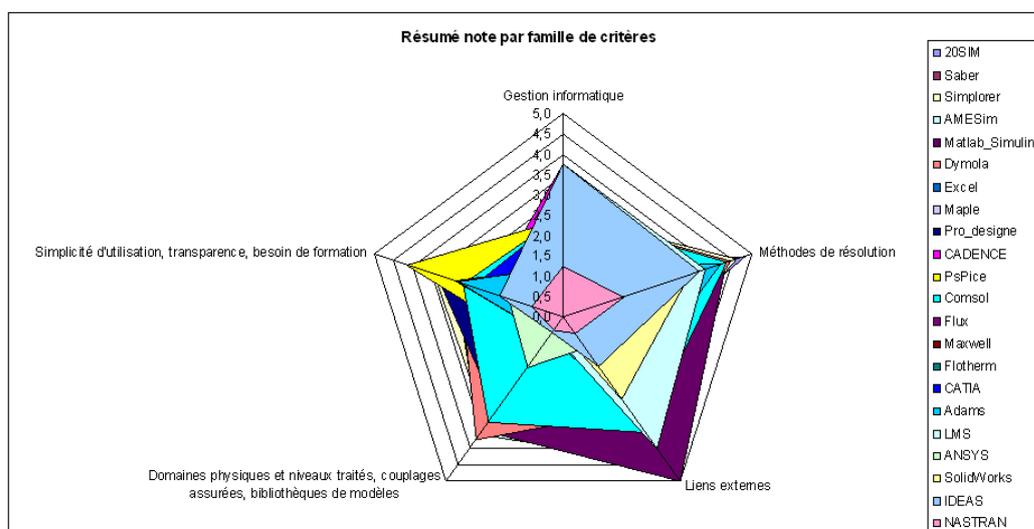


FIGURE 1.9 – Étude comparative entre divers outils de simulation([EJJABRAOUI 10])

Cette étude montre qu'aucun outil ne satisfait à 100% tous les critères d'évaluation. Certains critères tels que les liens externes avec les autres logiciels sont bien satisfaits par certains outils, par contre tous ces outils sont limités de point de vue domaines physiques traités et couplages multi-physiques assurés.

Dans cette étude, les langages de modélisation Bond-Graph, VHDL-AMS et Modelica ont été évalués à travers les logiciels 20Sim, Simplorer et Dymola respectivement.

### Bond-Graph :

L'outil Bond-Graph, qui a été introduit par Paynter [PAYNTER 61], est une méthode graphique de modélisation des systèmes dynamiques physiques. Les Bond-Graphs peuvent représenter des transferts des flux d'énergie ou d'information dans le système. Quoiqu'il soit bien utilisé pour la modélisation des systèmes physiques et multi-disciplinaires, l'inconvénient majeur des Bond-Graphs réside dans la nécessité d'effort supplémentaire par le concepteur pour effectuer ou saisir une modélisation avec cette représentation. La figure 1.10 montre un exemple de schéma électrique avec son équivalent Bond-Graph.

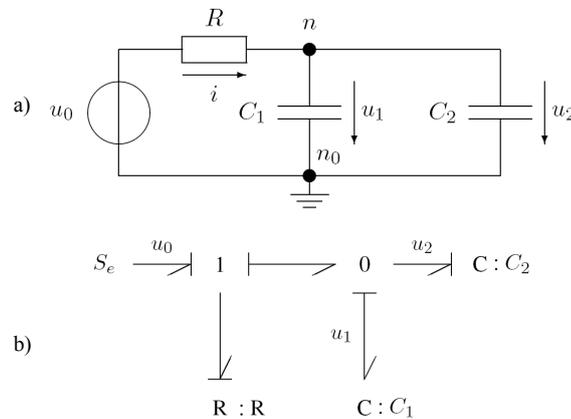


FIGURE 1.10 – Modélisation d'un circuit électrique avec Bond-Graphs : a) schéma électrique et b) schéma Bond-Graph équivalent

### VHDL-AMS :

VHDL-AMS est un langage standard de modélisation (norme IEEE 1076.1-1999) qui dérive du langage de description matériel VHDL (norme IEEE 1076-1993). Il est largement utilisé pour modéliser et simuler des systèmes électriques, les circuits intégrés complexes et des systèmes à signaux mixtes. Dans un précédent travail, [GUIHAL 07] a montré la capacité de ce langage pour la modélisation pluri-

disciplinaire des systèmes complexes. L'auteur a montré qu'il est possible d'assurer avec VHDL-AMS les trois niveaux de modélisation (conceptuel, logique et détaillé). Pourtant, les possibilités en modélisation fonctionnelle et physique 3D restent limitées avec VHDL-AMS.

### **Modelica :**

Modelica [ELMQVIST *et al.* 98] est un langage orienté objet qui a été développé pour la modélisation et la simulation des systèmes physiques. Il intègre la description mathématique déclarative des modèles. Il propose également l'approche graphique de modélisation à l'aide des diagrammes blocs. Basé sur, la technique de modélisation multi-ports, ses modèles sont réutilisables et il permet facilement de créer des bibliothèques de composants. Il permet la modélisation acausale (ou non causale) : les ports d'un modèle n'ont pas besoin d'être déclarés comme entrée ou sortie.

Bien qu'il permette la modélisation multi-physique : mécanique, électrique, thermique, hydraulique, etc, Modelica ne supporte pas la modélisation fonctionnelle, comparé avec SysML. La conception physique détaillée est limitée dans certains domaines tels que l'électronique comparé aux possibilités offertes par VHDL-AMS. Il ne supporte pas également la modélisation graphique 3D, comparé à un logiciel de Conception Assistée par Ordinateur (CAO) mécanique. Mais, suite à l'intégration de ce langage dans l'environnement de CAO-Product Lifecycle Management (PLM) CATIA V6, en plus de l'intégration de la modélisation fonctionnelle, la société DS présente déjà une plate-forme intégrée pour la conception multi-niveaux de systèmes complexes. Pourtant, il reste des développements à faire pour assurer la continuité de la simulation multi-physique entre le niveau système et le niveau détaillé des composants.

### **Simulink :**

Simulink est un logiciel de modélisation et de simulation multi-domaine des systèmes. Il utilise une approche graphique et un ensemble de bibliothèques contenant des blocs de modélisation et permettant la conception du système physique et de son système de contrôle, ainsi que la simulation de l'ensemble. L'intégration de Simulink avec MATLAB permet l'accès aux nombreux outils de développement, de visualisation et d'analyse des données de MATLAB. Par contre, Simulink ne supporte pas la modélisation fonctionnelle et les analyses multi-physiques 3D, au moins jusqu'à la date de rédaction de ce manuscrit.

Un des points communs entre les logiciels de simulation multi-domaine des systèmes physiques est leur capacité de simuler des problèmes physiques modélisés

avec des équations algébriques (Algebraic Equations (AE)), des équations différentielles ordinaires (Ordinary Differential Equations (ODE)) et des équations algèbro-différentielles (Differential Algebraic Equations (DAE)). Mais, ils sont tous limités devant des problèmes définis par des équations différentielles aux dérivées partielles (Partial Differential Equations (PDE)). D'autres outils tels que Comsol ou Ansys sont mieux adaptés dans ce cas.

**Comsol :**

Le logiciel Comsol est un outil de résolution des PDEs par éléments finis. Il a été développé au départ comme une 'Toolbox' de Matlab, il dispose aujourd'hui de son propre environnement de modélisation. Sa particularité est de permettre de coupler différentes PDE, de manière à définir différents phénomènes multi-physiques. Pourtant, comme tout logiciel de calcul par éléments finis, Comsol est contraint par le coût de calcul quand le modèle traité est de grande taille. Le fort lien entre Comsol, Matlab et Simulink permet de couvrir différents niveaux de simulation multi-physique, pourtant le niveau conceptuel de modélisation n'est pas bien intégré dans une telle plateforme.

**Ansys :**

Une autre solution présentée par la société Ansys pour répondre aux besoins de la simulation multi-physique en mécanique, correspond au développement de la plateforme WorkBench<sup>8</sup> et l'intégration des produits de la société Ansoft (Simplorer, Maxwell, etc), qui ont été rachetés par Ansys en 2008. Bien que Ansys WorkBench permette de définir des processus de simulation multi-physique au niveau des composants et d'assurer la simulation au niveau système avec Simplorer, le passage de la simulation du niveau des composants au niveau système n'est pas encore possible pour les modèles non-linéaires. Il en est de même pour la modélisation conceptuelle qui n'est pas supportée par cette plateforme.

La possibilité de supporter le niveau conceptuel et le niveau détaillé de conception par un outil de modélisation a l'avantage de définir au plus haut niveau de conception les métriques qui permettent d'évaluer le degré avec lequel le système physique conçu doit répondre aux concepts définis. Elle permet également aux différents concepteurs et spécialistes d'intervenir à différents niveaux de modélisation. Le problème qui reste à résoudre est le choix de l'outil de simulation convenable pour évaluer les métriques prédéfinies.

Un bon outil de simulation en mécanique doit être capable de vérifier les données

---

8. <http://www.ansys.com/Products/Workflow+Technology/ANSYS+Workbench+Platform>

définies dans le modèle lui même (modèle simulable). Il doit aussi être capable de garder une traçabilité avec les concepts déjà définis pour justifier la raison d'être d'un modèle et la raison pour laquelle une simulation doit être menée, ainsi que le niveau de validité du modèle par rapport aux métriques choisies. Pour cela, l'outil de modélisation-simulation doit permettre la continuité de transition à la fois entre le haut-niveau et le bas-niveau de conception ainsi que la remontée du bas-niveau au plus haut niveau. Par ailleurs, un bon outil de modélisation mécatronique doit également supporter les différentes techniques de modélisation mathématique (AE, ODE, DAE et PDE), ainsi que les techniques de résolution associées.

Malheureusement, cet outil idéal de modélisation-simulation mécatronique n'existe pas. En effet, les outils les plus performants répondent chacun partiellement aux attentes de la conception mécatronique. Dans ce cas, deux solutions sont envisageables. La première est le développement d'un nouvel outil qui répond à toutes les exigences de la conception mécatronique. Cette solution nécessite des années de développement avec des grandes ressources humaines et financières pour la concrétiser. Une deuxième solution, plus concrète, consiste à coordonner les outils existants pour pouvoir assurer une conception avec la continuité souhaitée. Pour réussir cette solution, les outils de modélisation et de simulation à utiliser doivent supporter le travail collaboratif avec des modèles distribués.

Dans une étude réalisée par Aberdeen Group [BOUCHER & HOULIHAN 08], les entreprises leaders dans le développement des produits mécatroniques stipulent qu'il est plus rentable de faire travailler des spécialistes de conception avec des outils destinés pour leurs domaines que de les faire travailler avec un logiciel qui "fait tout". Par contre, ces entreprises accordent une importance considérable aux méthodes de conception, pour qu'à la fois les concepteurs se focalisent sur leurs propres portions de travail et d'autre part, assurer une intégration des modèles développés avec différents langages et outils de modélisation.

Il est donc intéressant de voir les méthodes de conception utilisées pour en déduire celles qui sont adaptées à la conception mécatronique.

### 4.3 Les méthodes de conception

L'utilisation des techniques de modélisation et de simulation est étroitement liée au choix d'un processus de conception qui est de deux types : 'Bottom-up' ou 'Top-down'.

#### **Bottom-up :**

Le processus classique en conception mécanique ou électronique est un processus 'Bottom-up'. Le point de départ étant les spécifications fonctionnelles du système à concevoir, puis les composants de base (résistances, transistors, masse, ressort, etc) sont ajoutés et liés successivement pour constituer des sous-systèmes et des ensembles plus compliqués. Cette technique est utilisée par exemple pour la conception des cartes électroniques ou des systèmes mécaniques multi-corps.

L'avantage de cette méthode est sa simplicité et sa progressivité pour construire des structures complexes. Avec les outils de simulation intégrés avec la modélisation, chaque partie modélisée est vérifiée avant de la relier avec d'autres parties du système, ce qui permet de localiser facilement les erreurs de conception ou de modélisation.

Cependant, le système global ne pourra être validé qu'à la fin de la modélisation, quand toutes ces parties seront reliées. Ceci a pour conséquence de ne détecter les faiblesses du système que trop tard, après avoir investi un temps considérable de modélisation.

#### **Top-down :**

L'approche 'Top-down' se base sur une méthode de conception allant du plus abstrait jusqu'au plus détaillé. Le point de départ est un modèle descriptif des attentes de l'utilisateur, ensuite le modèle est enrichi d'un ensemble de fonctions qui couvre les spécifications du système. Le modèle est ainsi successivement partitionné et raffiné jusqu'à aboutir à sa définition détaillée. Les outils de modélisation se basant sur cette approche fournissent généralement les moyens de validation de chaque niveau d'abstraction avant de passer au niveau suivant plus détaillé.

A l'inverse de la méthode 'Bottom-up', les erreurs et les faiblesses du modèle sont découvertes au plus tôt. Ce qui permet de gagner un temps important de conception. Cependant, cette méthode nécessite l'emploi d'un outil informatique spécifique de modélisation des systèmes. En plus, le niveau de détail de modélisation des composants est limité avec cette approche. En mécanique par exemple, le développement géométrique des composants est effectué suivant une approche Bottom-Up et non pas Top-Down.

L'approche 'Top-down' est d'ailleurs la méthode adoptée en ingénierie des systèmes pour le développement des produits. Une méthode de développement d'un produit est définie par un modèle de cycle de vie qui se compose d'étapes qui doivent être établies (norme ISO/IEC-15288 [IEEE 04]). Dans une étude comparative des cycles de vie des produits, l'INCOSE [HASKINS 06] a établi un schéma (figure 1.11) qui montre les cycles de développement des systèmes suivant différentes normes.

## CHAPITRE 1. ÉTAT DE L'ART ET ENJEUX DE LA CONCEPTION MÉCATRONIQUE

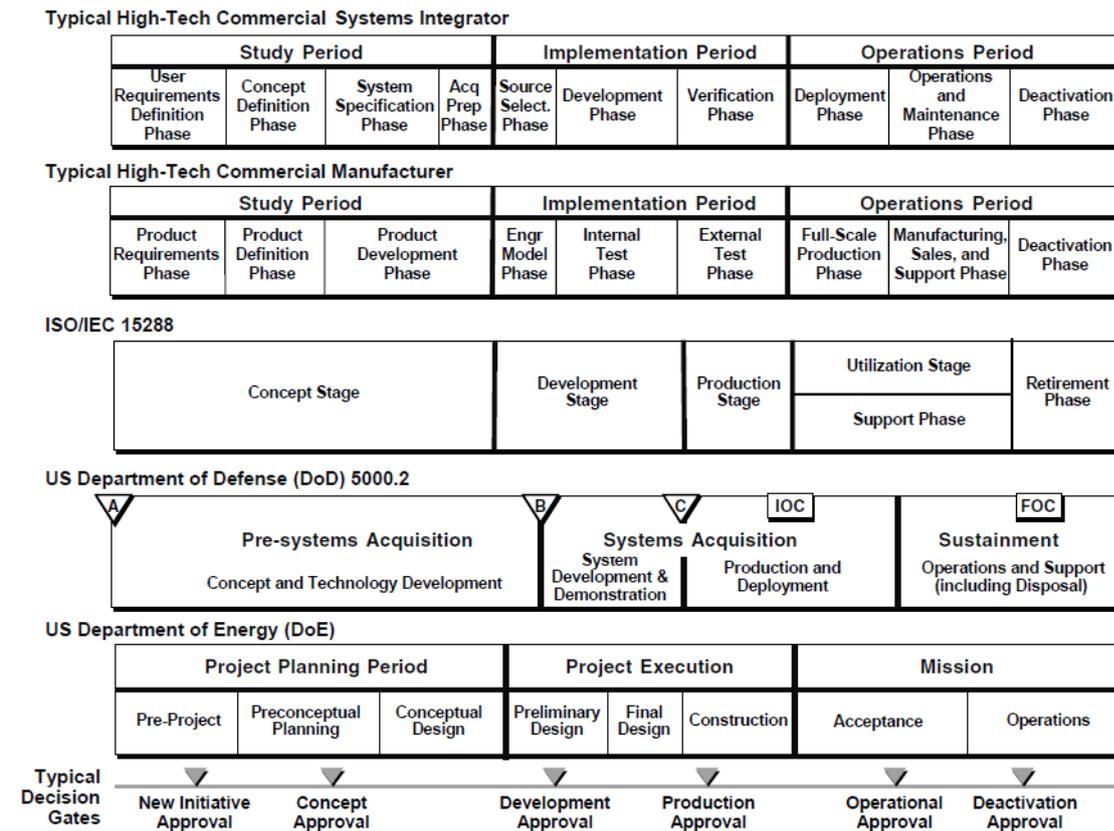


FIGURE 1.11 – *Comparaison des cycles de vie selon INCOSE [HASKINS 06]*

Selon la norme ISO/IEC-15288, le processus de conception des produits est constitué de deux étapes : l'étape des concepts (Concept stage) et l'étape de développement. L'étape des concepts, selon le US Department of Energy (DoE)<sup>9</sup>, est constituée des phases : avant-projet, planification pré-conceptuelle et le 'conceptual design'. L'étape de développement est constituée d'une phase de conception préliminaire et une phase de conception détaillée. Le processus de conception dans ces phases est basé sur l'élaboration des modèles, leur vérification et leur validation.

La notion des niveaux d'abstraction est également utilisée pour le développement des applications informatiques. Ainsi la méthode Merise [TARDIEU *et al.* 83] définit trois niveaux d'abstraction : niveau conceptuel, niveau logique et niveau physique.

9. <http://www.energy.gov/>

**Niveau conceptuel :**

Selon un point de vue informatique, le système est représenté par des concepts en faisant abstraction de son comportement. Ceci a pour but de préserver une indépendance entre le comportement du système informatique et les supports physiques à concevoir.

La notion du 'conceptual design' et son extension peuvent être considérées différemment suivant d'autres points de vue liés aux disciplines de la mécatronique.

[PAHLAND *et al.* 07] ont défini le 'conceptual design' comme étant la partie du processus de conception qui permet : l'identification des problèmes essentiels par l'abstraction, l'établissement d'une structure fonctionnelle, la recherche des principes de travail appropriés en les combinant dans une structure de travail menant vers une solution principale.

Selon ce dernier point de vue, le niveau conceptuel intègre à la fois les concepts, l'architecture fonctionnelle, l'architecture logique et la solution physique mais dans son plus haut niveau d'abstraction.

**Niveau logique :**

En ingénierie système, le niveau logique correspond à la définition des entités logiques qui représentent les exigences systèmes : la performance, l'évolution dans le temps, les flux d'énergies, les données échangées, etc. Ces exigences systèmes dérivent des exigences utilisateurs qui correspondent aux services à rendre par le système aux utilisateurs. Les entités logiques sont organisées dans une architecture logique avant que les éléments physiques qui vérifient cette architecture logique soient définis.

En électronique, la notion de logique prend un autre aspect. En effet, on parle des fonctions logiques qui sont de deux types : combinatoires et séquentielles. Les premières sont issues directement de l'algèbre de Boole en mathématique, et la deuxième introduit la notion du temps à la première. La mise en œuvre de la logique en électronique est assurée par les portes logiques qui sont les symboles de modélisation logique de type (AND, NAND, OR, NOR, etc.).

**Niveau physique :**

Le niveau physique correspond au niveau de modélisation le plus détaillé en informatique. Dans d'autres disciplines telles que la mécanique, la modélisation physique peut avoir différents niveaux d'abstractions : conceptuel, préliminaire et détaillé. L'architecture physique du système technique est matérialisée par des modèles géométriques 2D ou 3D des composants du système. Le comportement physique du système est défini par des modèles mathématiques plus ou moins fins qui permettent de valider le choix de l'architecture physique et la cohérence avec les exigences pré-

définies.

D'après cette présentation on remarque que certaines notions telles que : conceptuel, logique et physique peuvent avoir différents points de vue selon les différentes disciplines de la mécatronique. A titre d'exemple, DS définit une approche RFLP (Requirement, Functional, Logical, Physical) dans CATIA V6 pour laquelle l'étape de modélisation sous le module Dynamic Behavior Modeling (DBM), de langage Modelica, est considérée comme une phase de modélisation logique. La phase de modélisation physique concerne la maquette 3D. Ce qui peut être considéré autrement pour d'autres intervenants. D'où la nécessité d'unifier ces notions pour faciliter la communication entre les différents acteurs de la mécatronique.

Les processus de conception des systèmes sont définis suivant l'un des cycles connus : en cascade, en V ou en spirale. A l'origine, ces trois cycles sont définis comme des modèles pour le développement des logiciels. Le cycle en V (figure 1.12) a été défini, suite aux problèmes de réactivité du modèle en cascade. Il permet de détecter très tôt d'éventuelles anomalies et de limiter

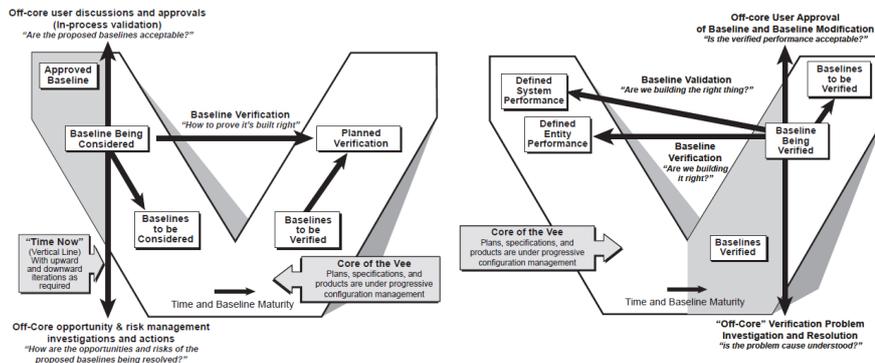


FIGURE 1.12 – Le cycle en V (source INCOSE [HASKINS 06])

le retour aux phases précédentes. Les phases de la partie montante permettent de renvoyer de l'information sur les étapes effectuées afin d'améliorer le système en développement.

Le modèle en spirale (figure 1.13), défini par Boehm [BOEHM 88], reprend les différentes phases du cycle en V. Il permet d'implémenter la notion de versions successives, le cycle recommence le processus de développement en proposant un produit de plus en plus complet. Le cycle en spirale insiste plus que le cycle en V

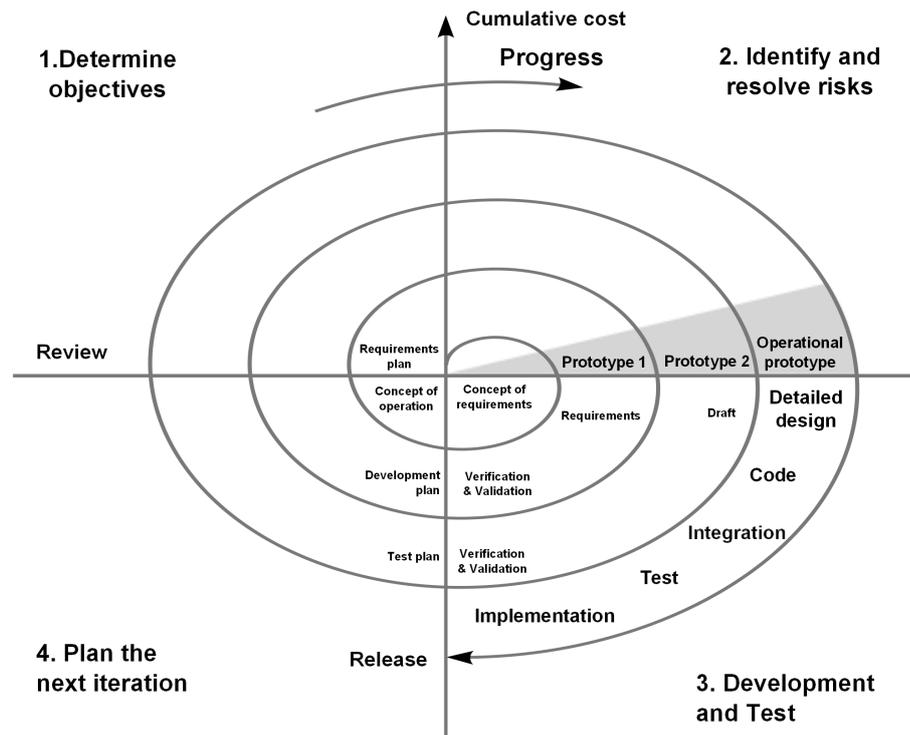


FIGURE 1.13 – *Le cycle en spirale* ([BOEHM 88])

sur la gestion des risques.

Une question qui se pose à ce niveau : est-t'il préférable d'adopter le cycle en V ou le cycle en spirale pour la conception des systèmes mécatroniques ? La réponse ne peut pas être automatique dans ce cas. En effet, tout dépend du système à concevoir. Si la solution principale est déjà connue, telle que le cas d'une entreprise qui va concevoir une nouvelle variante d'un produit qu'elle maîtrise, dans ce cas le cycle en V sera mieux adapté. Par contre, dans le cas d'une conception d'un nouveau produit dont les exigences ne peuvent pas être toutes identifiées dès le départ, mais que dans des phases avancées de conception, dans ce cas le cycle en spirale sera mieux adapté.

En conclusion, une bonne méthode de conception mécatronique est celle qui offre une meilleure collaboration entre les concepteurs multi-disciplinaires et qui favorise la communication entre eux. Elle doit permettre également de détecter les erreurs de conception au plus tôt. Cette méthode doit de même tenir compte des contraintes de

continuité de la conception entre les différents niveaux d'abstraction de modélisation. D'où une nécessité de la prise en compte de la problématique d'interopérabilité entre les outils de modélisation par la méthode de conception.

#### 4.4 La problématique d'interopérabilité

La conception d'un système mécatronique doit se faire dans un environnement collaboratif constitué des concepteurs multi-disciplinaires. La vérification et la validation de la conception sont en grande partie assurées par des logiciels de simulation. L'utilisation de plusieurs outils de modélisation et de simulation durant le processus de conception engendre des problèmes d'échanges de données aussi bien pour la modélisation que pour la simulation.

Une solution pour résoudre le problème d'interopérabilité en conception collaborative est l'utilisation de formats d'échanges standards de données. Le standard pour l'échange de données de produit, "STandard for the Exchange of Product model data (STEP)" correspond au standard de l'International Organization for Standardization (ISO)-10303. Il permet la représentation et l'échange de données de produits dans le but d'intégrer son cycle de vie (conception, développement, fabrication et maintenance). Pour couvrir les différents domaines du cycle de vie du produit, la notion de protocole d'application (Application Protocol (AP)) a été définie, pour permettre de spécifier le contexte, le domaine, les besoins en information et les méthodes utilisées. Ainsi l'AP203 est un standard d'échange de données des pièces et des assemblages mécaniques entre les logiciels de CAO. L'AP214 est le format d'échange de données concernant le processus de conception en automobile. L'AP210 est le format d'échange des assemblages électroniques et de leurs éléments de connexion. L'AP233 est destiné à l'échange de données en Ingénierie Système (IS).

Le langage d'échange de données "eXtensible Markup Language (XML)" est un format d'échange générique qui a facilité l'échange de données entre les systèmes d'information (l'interopérabilité). Plusieurs formats d'échange ont été définis en respectant la syntaxe XML. Le STEP-XML est ainsi un format d'échange STEP respectant le langage XML. De même, le format "XML Metadata Interchange (XMI)" est un standard d'échange de données (ISO/CEI 19503) basé aussi sur le langage XML, il est largement utilisé en IS. XMI est aussi utilisé comme formats d'échange pour certains logiciels de simulation multi-domaine.

La simulation collaborative multi-physique ou multi-domaine peut être assurée de deux manières : suivant une approche monolithique ou une approche modulaire

[ZHANG *et al.* 10].

L'approche monolithique se base sur l'utilisation d'un seul environnement de développement basé sur un seul outil ou un seul langage. Les logiciels multi-domaines (Simulink, Dymola, AMESim, etc) sont des exemples de cette catégorie. L'utilisation d'un seul environnement de simulation assure une cohérence pour l'intégration des modèles à simuler. Cependant, les outils monolithiques ne peuvent être utilisés que pour un champ limité de problèmes de simulation.

La deuxième technique (l'approche modulaire) consiste à diviser le système complexe en un nombre de sous-systèmes (ou modules) de moindre complexité et qui peuvent être simulés avec des outils de simulation spécifiques disponibles. L'intégration des modules et leur simulation peuvent être assurées par la co-simulation.

La co-simulation est une technique particulière de simulation qui permet d'associer deux ou plusieurs simulateurs pour la simulation multi-disciplinaire, multi-physique et multi-échelle (géométrique et temporaire). Une solution pour assurer la co-simulation est de développer une interface spécifique entre deux outils de simulation qui permet à l'un de deux outils d'accéder au processus de simulation de l'autre. L'interface de co-simulation entre Simulink et le logiciel de calcul cinématique et dynamique ADAMS<sup>10</sup> est un exemple.

Une deuxième possibilité de co-simulation est d'utiliser un environnement de co-simulation comme milieu d'échange commun entre plusieurs simulateurs.

Bien qu'elle résolve un grand problème lié à l'interopérabilité entre les simulateurs, la difficulté avec la co-simulation réside dans sa mise en œuvre qui est en liens avec les problèmes de communication entre les simulateurs, leur synchronisation, le temps de calcul, etc. Il est également très délicat d'assurer une optimisation multi-disciplinaire sur des processus de co-simulation vu qu'il n'est pas évident d'assurer une continuité de communication entre les simulateurs durant tout le processus d'optimisation.

En conclusion, le format d'échange STEP est bien employé au niveau détaillé de conception, par contre au niveau conceptuel, des formats basés sur le langage XML sont mieux adaptés. Un format d'échange standard unique pour tout le cycle de conception n'est pas encore disponible. Pour la simulation multi-disciplinaire, la technique de co-simulation résout en partie le problème d'interopérabilité entre les outils de simulation. Mais, cette technique n'offre pas la flexibilité nécessaire pour permettre au concepteur d'intervenir pendant la simulation pour analyser ou modi-

---

10. <http://www.mscsoftware.com/Products/CAE-Tools/Adams.aspx>

fier les paramètres de simulation. Il faut aussi signaler que la co-simulation n'est pas adaptée pour coupler des simulateurs de niveau de modélisation différents tels que le cas de simulateurs éléments finis et les simulateurs multi-domaines. Enfin, l'interopérabilité par co-simulation n'est pas une solution pratique pour des processus d'optimisation multi-disciplinaire.

#### 4.5 Optimisation des systèmes mécatroniques

Dans une conception multi-disciplinaire comme celle de la mécatronique, l'optimisation fait partie du processus de conception aux différents niveaux de modélisation.

Au plus haut niveau de conception, l'optimisation permet de retenir parmi des architectures logiques et physiques, celles qui répondent le mieux aux objectifs définis par les exigences du système et de l'entreprise. Pour cela, des modèles paramétriques valides doivent être élaborés pour modéliser les métriques d'évaluation telles que la performance, la fiabilité, les coûts, la disponibilité, la sûreté de fonctionnement, etc. Dans un niveau de modélisation intermédiaire, l'optimisation du comportement dynamique du système mécatronique peut être réalisée en choisissant le bon compromis entre les paramètres du système multi-physique et les paramètres du système de contrôle.

Au niveau de la conception détaillée, l'optimisation géométrique permet de choisir la forme, les dimensions et la topologie convenables des composants de la solution retenue. Ces configurations géométriques peuvent être en étroite liaison avec les paramètres physiques des composants. Une optimisation géométrique avec couplage multi-physique faible ou fort est nécessaire pour trouver les configurations géométriques optimales en tenant compte des contraintes multi-physiques.

Optimiser un système mécatronique aux différents niveaux de sa conception et par rapport aux différentes disciplines peut ne donner que des solutions optimales locales et pas une solution optimale globale. Ainsi, pour trouver l'optimum global un couplage est nécessaire entre les différents niveaux de conception et entre les différentes disciplines.

De plus, la complexité du système mécatronique augmente la taille du domaine d'optimisation. Le coût de calcul augmente en conséquence avec le nombre d'évaluations. Certains algorithmes d'optimisation peuvent donner des résultats fiables si on travaille avec quelques variables de conception, mais ils deviennent inefficaces avec à un nombre élevé de variables.

[TOUYA 08] a présenté une étude détaillée des différents algorithmes d'optimisation que le lecteur peut consulter pour un exposé complet.

Enfin, l'enjeu de l'optimisation multi-disciplinaire dans le processus de conception des systèmes mécatroniques est étroitement lié à l'interaction entre les différents problèmes liés à la méthode de conception, outils de modélisation et interopérabilité.

## 5 Conclusion

Dans ce chapitre nous sommes partis de plusieurs définitions de la mécatronique qui diffèrent dans leurs expressions mais qui se rencontrent sur un objectif commun : celui de l'intégration synergique entre les disciplines pour concevoir et fabriquer des produits performants.

Par la suite, nous avons parcouru rapidement quelques situations rencontrées en conception automobile moderne, qui est un domaine très intéressé par la problématique d'intégration mécatronique.

Enfin, les enjeux liés à cette problématique ont été présentés. Une analyse de ces enjeux montre que la complexité de la conception mécatronique provient d'une complexité technique liée aux outils de modélisation et d'une complexité organisationnelle liée aux méthodes de modélisation. La difficulté de l'optimisation d'un système mécatronique est liée à l'interaction de ces deux complexités.

La réussite d'une approche de modélisation et de simulation multi-physique en mécatronique ne peut être vue que dans un contexte global de conception mécatronique, nous présenterons donc dans le chapitre suivant, une approche qui peut répondre à ces besoins d'intégration mécatronique, en se basant sur le concept de la méta-modélisation.

CHAPITRE 1. ÉTAT DE L'ART ET ENJEUX DE LA CONCEPTION  
MÉCATRONIQUE

---

# Chapitre 2

## Méthodologie de conception intégrée pour la mécatronique

### 1 Introduction

Après avoir présenté les enjeux pour assurer une conception intégrée en mécatronique, nous proposons dans ce chapitre, une méthodologie de conception qui permet de répondre aux exigences de cette intégration. Cette approche se base sur l'utilisation d'une plateforme de conception dans laquelle la simulation multi-physique occupe une partie centrale pour permettre la vérification des modèles, l'interopérabilité entre différents niveaux de modélisation et l'optimisation multi-disciplinaire. Cette approche se base sur la technique de réduction du niveau d'abstraction ou la méta-modélisation.

Dans ce chapitre, nous commençons ainsi par une présentation générale des niveaux d'abstraction et de la méta-modélisation. Ensuite, nous détaillerons la technique de méta-modélisation par approximation qui a été retenue pour la création des modèles d'évaluation. A la fin, nous proposons une méthodologie qui permet d'intégrer la simulation multi-physique dans le processus de conception mécatronique.

### 2 Les niveaux d'abstraction et la méta-modélisation

Quelle que soit la discipline scientifique considérée, la notion de modèle est une abstraction d'un objet quelconque, construite dans un objectif précis. Le modèle est alors considéré comme une représentation de l'objet dans la mesure où il est capable de fournir un ensemble 'restreint' d'informations sur l'objet considéré d'une façon

descriptive ou prédictive. Ainsi, la notion d'abstraction sert à réduire le niveau de détail des informations sur l'objet. Par conséquent, suivant les niveaux d'abstraction, plusieurs modèles peuvent représenter le même objet.

De son côté, la notion de méta-modèle a été utilisée dans divers domaines tels que la linguistique, la recherche opérationnelle et l'informatique.

Le mot méta-modèle a été publié pour la première fois en 1975 par deux linguistes dans leur livre 'The Structure of Magic' [BANDLER & GRINDER 75], pour formaliser des modèles linguistiques. Dans la même année [BLANNING 75] a utilisé le mot méta-modèle pour désigner un modèle, élaboré avec une approche statistique, qui substitue un code de calcul pour l'analyse de la sensibilité dans le domaine de la recherche opérationnelle. Ce dernier type de méta-modèle est aussi appelé modèle de substitution.

Dans le domaine du développement des applications informatiques, l'OMG décrit trois niveaux de modélisation : les niveaux M1, M2 et M3 qui correspondent respectivement au modèle, méta-modèle et méta-méta-modèle. Le niveau M0, selon l'OMG, fait référence à l'objet physique du monde réel qui est représenté avec un modèle de niveau M1 (figure 2.1).

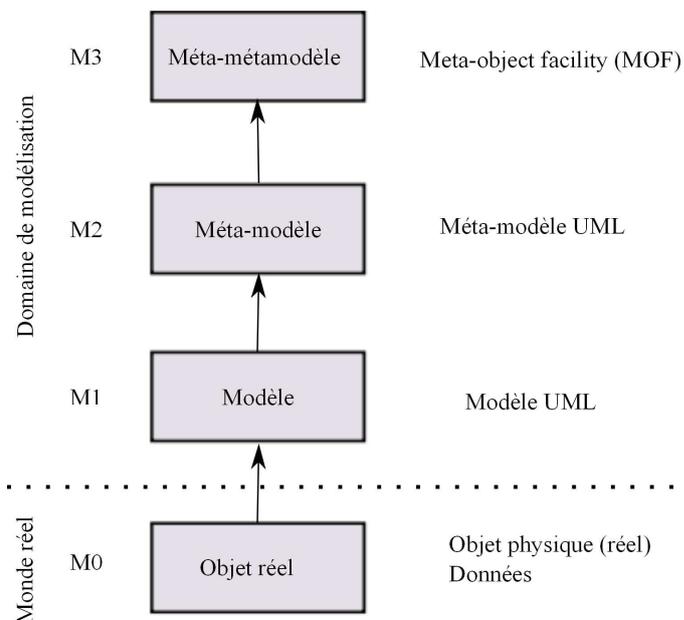


FIGURE 2.1 – Les niveaux d'abstraction de modélisation (OMG)

Dans ce cas, le méta-modèle correspond au langage de modélisation avec lequel a été

écrit le modèle (ou le code) et le méta-métamodèle correspond au langage de méta-modélisation, c'est à dire le langage utilisé pour écrire un langage de modélisation. D'ailleurs, en se basant sur cette notion, l'OMG a publié à la fin 2000, l'approche de développement d'applications informatiques "Model-Driven Architecture (MDA)" qui a pour objectif d'améliorer l'interopérabilité des modèles informatiques en séparant les spécifications fonctionnelles d'un système, des spécifications de son implémentation dans une plate-forme donnée. L'OMG propose ainsi le "Meta-Object Facility (MOF)" [OMG 06] comme un langage de méta-modélisation et l'UML comme langage de modélisation. Ainsi l'UML est construit à partir de MOF et les données UML générées sont appelées méta-données (Metadata).

Par ailleurs, le langage de méta-modélisation et de modélisation des systèmes SysML, un profil d'UML, a également été construit par l'OMG à partir de MOF, pour répondre aux besoins de la modélisation en ingénierie des systèmes.

La notion de trois niveaux d'abstraction est aussi rencontrée dans le domaine d'échange des données. En effet, le langage standard d'échange XML proposé par l'OMG, peut aussi être utilisé pour l'échange de méta-données dont le méta-modèle est exprimé en MOF. En particulier, XMI est un standard d'échange basé sur XML pour l'échange des modèles UML, bien qu'il puisse être utilisé pour l'échange des modèles créés avec d'autres langages.

La méta-modélisation constitue également une alternative pour résoudre le problème d'interopérabilité entre les modèles multi-domaines. En effet, plusieurs auteurs ([WOOD *et al.* 08], [POP 08], [PAREDIS & JOHNSON 08] et [PAREDIS *et al.* 10]) proposent d'adopter UML ou SysML comme langages de méta-modélisation pour les langages de modélisation multi-domaine VHDL-AMS et Modelica. Ainsi, les concepts généraux et les spécifications fonctionnelles des modèles sont définis avec UML ou SysML, ensuite ces modèles sont convertis dans les langages Modelica ou VHDL-AMS pour les spécifications physiques et la simulation.

Comme cas d'études, les auteurs dans [WOOD *et al.* 08], ont proposé un environnement de génération automatique des codes VHDL à partir d'une méta-modélisation UML et ils ont montré l'application de la démarche pour la modélisation des systèmes embarqués.

Dans la même perspective, [POP 08] propose d'étendre le langage de modélisation Modelica pour supporter la méta-modélisation. Ainsi, ModelicaML a été proposé comme un profil UML pour la méta-modélisation orientée objet basée sur les équations. L'environnement créé permet de faciliter le passage des modèles UML vers

des modèles simulables en langage Modelica.

Toutefois, les deux derniers travaux cités ne résolvent qu'une partie des problèmes d'interopérabilité concernant le passage d'un haut niveau d'abstraction vers un niveau plus bas.

Dans d'autres références ([PAREDIS & JOHNSON 08] et [PAREDIS *et al.* 10]), SysML a été choisi comme un langage de méta-modélisation pour l'échange bidirectionnel entre les langages et outils de modélisation multi-domaine. Les auteurs ont montré que l'échange entre chaque outil de modélisation multi-domaine et SysML permet une interopérabilité bidirectionnelle entre les langages et les outils de modélisation multi-domaine.

Par ailleurs, une autre solution a été présentée par [SIEMERS *et al.* 09] qui consiste à définir un environnement de co-simulation et de méta-modélisation qui permet de connecter des méta-modèles, élaborés à partir de modèles développés dans leurs environnements de modélisation. L'environnement de co-simulation et de méta-modélisation a été développé en utilisant le langage de modélisation Modelica. Les modèles extérieurs sont traités comme des boîtes noires. Ainsi, l'environnement permet de définir les connexions entre les modèles, les types des données à échanger, les paramètres de simulation de chaque modèle, etc.

Toutefois, il faut signaler que la notion de méta-modélisation selon l'OMG fait intervenir les règles de transformation qui expriment la correspondance entre les concepts au niveau méta-modèle. Pour la notion de méta-modélisation au sens modèle de substitution, il n'existe pas d'études qui formalisent ces règles de transformation. Par conséquent, les règles de transformation ne seront pas traitées dans ce manuscrit et on se limitera juste à la notion des niveaux d'abstraction qui est commune aux deux notions de méta-modélisation. Par ailleurs, nous désignerons par 'méta-modélisation par approximation' les modèles de substitution établis avec des approches statistiques.

Sur la base de plusieurs niveaux d'abstraction, le processus de conception des systèmes mécatroniques peut être effectués sur trois niveaux : niveau préconception (ou conceptuel), conception préliminaire et conception détaillée avec des phases de vérification et de validation. La vérification de la conception au niveau conceptuel (ou fonctionnel) peut être effectuée avec des outils de méta-modélisation tels que SysML. La vérification au niveau préliminaire et détaillé est en grande partie effectuée avec des simulations numériques nécessitant l'élaboration des modèles mathématiques et l'utilisation des diverses techniques de résolution.

Les modèles mathématiques utilisés pour la modélisation des systèmes mécatroniques peuvent aussi être répartis sur trois catégories, suivant la complexité de résolution de ces modèles et les outils utilisés pour la simulation. Ainsi, au plus haut niveau, on peut situer les équations algébriques (AEs) ou les lois se basant sur les fonctions mathématiques élémentaires. Au niveau préliminaire, on peut situer les équations différentielles ordinaires (ODEs) et algébro-ordinaires (DAEs). Au plus bas niveau, on peut situer les équations différentielles aux dérivées partielles (PDEs).

Il est intéressant de noter à ce niveau que parmi les techniques numériques employées pour la résolution des PDEs, on doit citer la méthode des éléments finis (MEF). La technique utilisée pour la résolution d'un problème avec la MEF est soit d'éliminer complètement les PDEs tel que dans le cas du régime permanent, soit en approximant le problème avec des ODEs. Malgré les avantages de la méthode d'analyse par éléments finis pour résoudre des problèmes multi-physiques couplés, l'inconvénient majeur de cette méthode est son coût de calcul. En effet, le problème initial défini par des PDEs est discrétisé dans l'espace pour donner un système d'ODEs d'ordre élevé.

Le coût élevé des analyses par éléments finis est un verrou majeur pour simuler tout un système mécatronique avec cette méthode, mais elle est plutôt appliquée pour des analyses locales. Par contre, les outils et les langages de modélisation multi-domaine sont mieux placés pour analyser les systèmes mécatroniques. En effet, ces derniers offrent la possibilité de combiner la simulation multi-domaine des variables continues et discrètes ainsi que la simulation des phénomènes événementiels en intégrant les systèmes de contrôle. Par contre, les outils multi-domaines sont limités devant les problèmes modélisés avec des PDEs. Pour pouvoir combiner les avantages de la modélisation par éléments finis avec la modélisation multi-domaine au niveau système, on peut utiliser la technique de réduction d'ordre des modèles EF. Ainsi, le modèle réduit issu des EF peut être intégré dans un outil de modélisation multi-domaine, suivant le passage d'un bas niveau de modélisation (PDE) vers un niveau de modélisation plus haut (ODE). La technique de réduction d'ordre est une technique de méta-modélisation qui permet l'interopérabilité entre les modèles de niveau détaillé de conception (niveau M1) et les modèles de conception préliminaire (niveau M2).

La technique de réduction des modèles trouve ses origines dans la conception des structures mécaniques et plus particulièrement en analyse vibratoire. Elle se base sur la projection du système des ODEs d'ordre élevé issue de l'analyse EF

sur une base modale choisie de manière à ne garder que les modes et les vecteurs propres qui ont une influence sur les résultats recherchés. Par conséquent, l'ordre du problème est réduit. Pour les problèmes linéaires, la formulation réduite du problème est convertible en un problème défini par un espace d'état qui peut être intégré dans un outil de simulation multi-domaine pour les analyses de niveau système.

Le choix de l'espace de projection, s'effectue suivant l'une des méthodes connues telles que la méthode de Guyan [GUYAN 65], la méthode de Craig et Bampton [CRAIG & C.C. BAMPTON 68] ou la méthode de Krylov [TAN 07].

L'utilisation de la technique de réduction des modèles a été élargie pour s'appliquer à la conception des systèmes multi-physiques tels que les MicroElectroMechanical Systems (MEMS). La figure 2.2 montre le principe de réduction des modèles éléments finis.

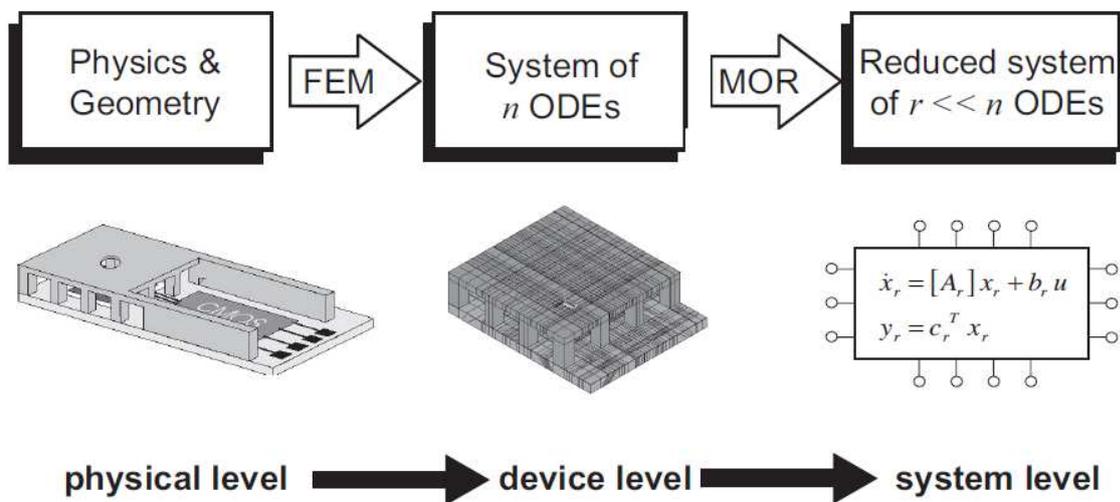


FIGURE 2.2 – Principe de réduction des modèles EF [BECHTOLD 05]

En dépit des avantages que présentent la méthode de méta-modélisation par réduction des modèles, surtout pour l'étude transitoire d'un certain nombre de phénomènes physiques, cette méthode présente des limitations pour l'analyse des systèmes mécatroniques. En effet, il est difficile d'adapter cette méthode pour des problèmes non-linéaires et multi-physiques. D'autre part, pour appliquer cette méthode, la configuration géométrique du problème traité doit être déjà établie. C'est à dire, si la configuration géométrique change, il faut appliquer de nouveau la méthode de réduction des modèles EF. Or, pour la conception d'un système mécatronique il est courant d'explorer les configurations géométriques dans le but de rechercher la configuration optimale. Par conséquent, la technique de réduction des modèles EF

est limitée devant les problèmes d'optimisation géométrique.

Le passage du niveau détaillé d'analyse (M1) vers des niveaux plus hauts M2 et M3, peut être assuré avec la technique de méta-modélisation par approximation. Ce passage est intéressant en conception mécatronique car il permet de garder un lien entre le niveau conceptuel (M3) et les niveaux de modélisation M2 et M1 pour vérifier si les modèles définis en M2 et M1 sont valides vis-à-vis des exigences définies en M3. Le passage du niveau de modélisation M2 vers le niveau M3 est aussi intéressant dans la mesure où il permet d'obtenir des modèles empiriques pour les métriques d'évaluation, ce qui permet dans une future conception de disposer de modèles de vérification dès le niveau conceptuel.

La technique de méta-modélisation par approximation a ainsi été adoptée comme une méthode de modélisation qui permet de répondre à la majorité des attentes de la conception mécatronique, notamment en terme d'interopérabilité et d'optimisation multi-disciplinaire, multi-physique et multi-niveaux. Cette méthode est détaillée dans le paragraphe suivant.

### 3 La méta-modélisation par approximation

Dans un contexte de modélisation mécatronique, la simulation numérique permet de valider les problèmes souvent de grandes dimensions et complexes. Les outils et les langages de modélisation multi-domaine de type Matlab/Simulink, Modelica et VHDL-AMS sont bien adaptés pour modéliser ces types de systèmes complexes. Pourtant, il est connu que ces derniers outils sont limités devant les problèmes de modélisation dont la physique est fortement liée à la géométrie. Dans ce contexte, le recours à des codes de calcul mieux adaptés, mais plus coûteux en temps de calcul, constitue une solution justifiée même économiquement. Car il est possible, par exemple, de passer des mois à chercher un modèle analytique pour un problème multi-physique couplé avec la géométrie, alors que ce problème pourrait être résolu en quelques heures avec un code de calcul par éléments finis. Par ailleurs, une approche privilégiée consiste à définir, à partir d'un nombre réduit de simulations, un ou plusieurs modèles approximatifs permettant d'approcher le simulateur. Ce qui permet d'avoir des modèles relativement simples et permettant de répondre à plusieurs enjeux liés à la modélisation mécatronique. Les modèles approchés sont appelés des modèles réduits, Surfaces de Réponse (SR), modèles de substitution ("surrogate models") ou méta-modèles.

L'utilisation de la technique d'approximation par les surfaces de réponse a commencé avec les travaux de Box et Wilson [BOX & WILSON 51] dans le but de trouver, à partir des expérimentations, les conditions opératoires sur un ensemble de variables de contrôle pour pouvoir localiser une réponse optimale. A partir des années 1970, cette technique a connu des évolutions importantes, ce qui a permis de résoudre plusieurs problèmes de modélisation linéaire et non-linéaire dans différents domaines [KHURI 05]. La méta-modélisation par approximation est utilisée pour réaliser des optimisations coûteuses en temps de calcul, en approximant le domaine à modéliser par les valeurs des fonctions évaluées en certains points du domaine de modélisation et en effectuant l'optimisation sur une surface de réponse.

Pour une formulation mathématique de cette technique, appelons  $\mathbf{X}$ , une matrice constituée de  $n$  colonnes représentant les variables d'entrée du problème à modéliser et  $m$  lignes représentant le nombre de niveaux pour chaque variable de modélisation. Le nombre de niveaux d'une variable correspond au nombre de subdivisions, plus un, de l'intervalle de variation relative à la variable considérée. On suppose pour la suite que le nombre de niveaux est le même pour toutes les variables de modélisation :

$$\mathbf{X} = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{pmatrix} \quad (2.1)$$

La fonction  $F(\mathbf{X})$  est définie par un processus de simulation. Par conséquent, il est possible d'évaluer  $F(\mathbf{X})$  aux différents points de simulation. Une fonction d'approximation  $F_a(\mathbf{X})$  est définie par :

$$F_a(\mathbf{X}) = F(\mathbf{X}) + \mathbf{e} \quad (2.2)$$

$\mathbf{e} = [e_1, e_2, \dots, e_n]$  est le vecteur ligne des résidus (erreurs) entre le modèle d'approximation et le modèle de simulation.

Le choix de l'emplacement des points d'évaluation est important pour avoir une bonne approximation, surtout dans le cas d'un calcul coûteux. La méthodologie utilisée pour la formulation des points d'évaluation est connue sous le nom de plan d'expériences (Design Of Experiments (DOE)).

Pour la construction du modèle d'approximation, on commence par identifier les variables d'entrée  $\mathbf{X}$  que l'on définit dans un domaine borné  $D_f$ . L'étape suivante consiste à distribuer chaque variable sur un nombre  $m$  de niveaux dans ce domaine. La fonction de sortie  $F(\mathbf{X})$  est ensuite évaluée aux points d'échantillonnage par le processus de simulation. Une fois les données d'entrée et de sortie disponibles, il est

possible d'utiliser une méthode d'approximation pour définir le méta-modèle  $F_a(\mathbf{X})$  sur tout le domaine. En dernière étape, la qualité du méta-modèle est vérifiée en calculant les erreurs entre  $F(\mathbf{X})$  et  $F_a(\mathbf{X})$ .

La technique de validation croisée permet de mesurer le degré de fiabilité du méta-modèle. Cette technique consiste à effectuer la construction du méta-modèle sur un ensemble de données et d'effectuer la validation sur un autre ensemble.

Ainsi, plusieurs indicateurs peuvent être utilisés pour qualifier le méta-modèle : l'erreur moyenne, l'erreur quadratique moyenne (Root Mean Square (RMS)), l'erreur maximale, le coefficient de détermination, etc.

Pour une variable d'entrée quelconque  $x_i, 1 \leq i \leq n$ ; avec  $x_i = [x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{mi}]^T$ , l'erreur moyenne est définie par :

$$Em_i = \frac{|\sum_{j=1}^m (F(x_{ji}) - F_a(x_{ji}))|}{m}; 1 \leq i \leq n \quad (2.3)$$

L'erreur quadratique moyenne permet de mesurer l'ampleur de la variation de l'erreur. Elle est définie par :

$$Erms_i = \frac{\sqrt{\sum_{j=1}^m [F(x_{ji}) - F_a(x_{ji})]^2}}{m}; 1 \leq i \leq n \quad (2.4)$$

L'erreur maximale, donne le maximum d'erreur sur l'ensemble des couples  $(x_{ij}, [F(x_{ji}) - F_a(x_{ji})])$  :

$$Emax_i = \max_j (|F(x_{ji}) - F_a(x_{ji})|); 1 \leq i \leq n; 1 \leq j \leq m; \quad (2.5)$$

Le coefficient de détermination permet d'avoir une idée globale de l'ajustement du méta-modèle, il est donné par [REN & CHEN 10] :

$$R_i^2 = 1 - \frac{\sum_{j=1}^m [F(x_{ji}) - F_a(x_{ji})]^2}{\sum_{j=1}^m [F(x_{ji}) - \bar{y}_i]^2}; 1 \leq i \leq n \quad (2.6)$$

$\bar{y}_i$  est la valeur moyenne des valeurs de  $F_a(x_{ji})$  :

$$\bar{y}_i = \frac{\sum_{j=1}^m F_a(x_{ji})}{m}; 1 \leq i \leq n; 1 \leq j \leq m; \quad (2.7)$$

Plus la valeur de  $R_i^2$  est proche de 1 plus le méta-modèle est intéressant. L'analyse des erreurs et par conséquent la qualité du méta-modèle doit s'effectuer aux points de simulation générés par le plan d'expériences pour valider la bonne adéquation entre les observations et les prévisions, mais aussi à n'importe quel ensemble de points de simulation dans le domaine de conception pour tester la capacité du méta-modèle à prédire la valeur de la réponse étudiée.

### 3.1 Plans d'expériences

Les plans d'expériences (DOE) sont connus comme des techniques de planification des expérimentations physiques. Leur objectif principal est d'extraire le plus d'information possible avec un nombre réduit d'expériences. Ils aident à identifier les facteurs importants, leur interaction et leur influence dans un processus donné. Dans notre contexte, ils seront appliqués pour réaliser des expérimentations numériques sur des processus de simulation. Une différence majeure entre les plans d'expériences classiques et les plans d'expériences numériques, est que dans le premier cas on suppose la présence d'erreurs aléatoires dues aux mesures et aux conditions expérimentales. Ce qui n'est pas le cas pour les simulations déterministes. Ainsi, si dans les plans d'expériences classiques on autorise l'expérimentation plus qu'une fois en un même point pour analyser la répétabilité, ceci n'a pas d'intérêt dans le cas de simulations déterministes. Par conséquent, les plans d'expériences classiques ne sont pas tous adaptés aux expérimentations numériques.

Le choix d'un plan d'expériences est critique pour la bonne construction d'un métamodèle. Ainsi, pour réussir cette construction, le plan d'expériences numériques doit répartir les points de simulation dans le domaine de modélisation le plus uniformément possible de façon à capter le comportement du phénomène à modéliser (linéaire ou non-linéaire) mais aussi sans répétition de points. Par ailleurs, il doit également permettre d'identifier les variables influentes dans le processus de simulation pour ne garder que les variables qui sont significatives dans le processus de construction du méta-modèle. Enfin, le plan d'expériences doit assurer un compromis entre le coût de la simulation et la taille du problème à modéliser d'un point de vue du nombre d'échantillons, qui doit être suffisamment important pour construire un méta-modèle de bonne qualité.

Une étude comparative d'une dizaine de plans d'expériences a été présentée par Franco [FRANCO 08]. Nous nous limiterons à présenter quatre plans d'expériences qu'on a jugé importants pour l'expérimentation numérique : les plans factoriels (complets et fractionnaires) et les plans Latin Hypercube (classiques et optimaux).

### 3.1.1 Plans factoriels

Le terme factoriel provient du mot facteur qui veut dire ici une variable de conception. Le plan factoriel est la méthode la plus simple qui permet un bon remplissage de l'espace de conception. Les points de simulation, dans un plan factoriel complet, sont choisis dans une grille régulière. Cette méthode est intéressante si le nombre de niveaux  $m$  est petit. La figure 2.3 schématise un plan factoriel pour deux variables ( $n = 2$ ) et ( $m = 4$ ) niveaux. Mais, dès que la dimension de l'espace devient grande, le nombre de simulations  $p = m^n$  devient très élevé. Dans ces conditions, le plan factoriel fractionnaire constitue une alternative pour réduire le nombre de simulations. Pour plus de détail le lecteur peut consulter [FRANCO 08].

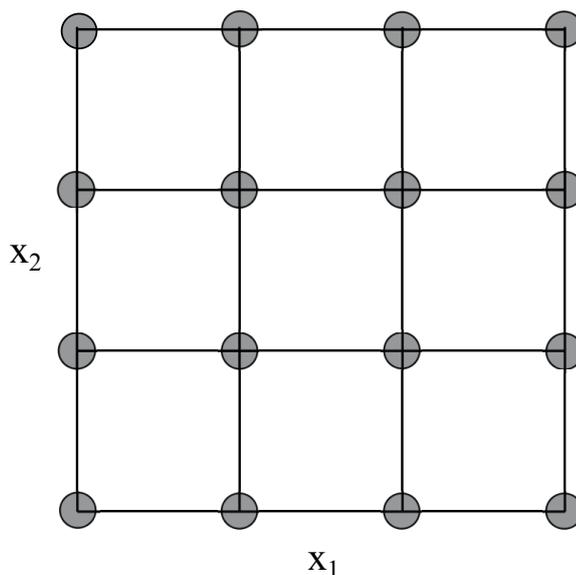


FIGURE 2.3 – Un plan factoriel complet ( $n=2$ ,  $m=4$ )

### 3.1.2 Plans Latin Hypercube

Le plan d'expériences Latin Hypercube (LH), qui a été introduit par Mackay [MACKAY *et al.* 79], est l'une des techniques les plus utilisées pour les expérimentations numériques. Avec cette méthode, chaque variable d'entrée est subdivisée en  $m$  niveaux uniformément répartis et à chaque niveau un seul point d'évaluation est considéré. Ainsi pour  $n$  variables et  $m$  niveaux, une matrice est calculée et elle est

utilisée pour déterminer les points de simulation dans le domaine de modélisation. La façon de calculer l'emplacement des points d'évaluation avec le LH peut s'effectuer suivant deux approches. La première est le LH classique où les combinaisons des points d'évaluation sont déterminées d'une façon aléatoire, la deuxième est le LH optimal qui est plus structuré et les combinaisons des points sont optimisées afin d'harmoniser leur distribution. L'une des techniques d'optimisation de la distribution des points est la maximisation de la distance minimale entre les couples de points de simulation. La méthode optimale assure une meilleure distribution des points de simulation que la méthode classique, mais avec un temps de génération des points relativement supérieur à la méthode classique.

La figure 2.4 montre deux matrices générées par LH et qui correspondent respectivement à la méthode classique et à la méthode optimale pour un problème à 2 variables et 10 niveaux.

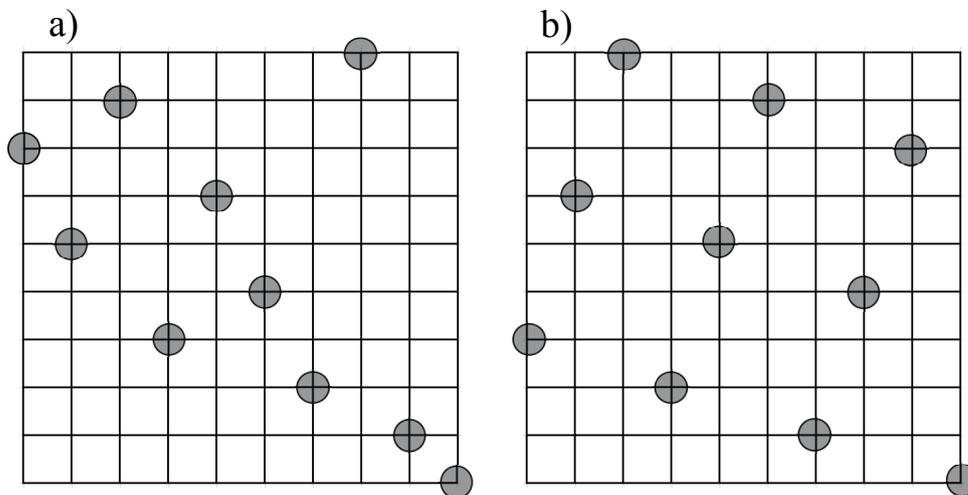


FIGURE 2.4 – *Plan Latin Hypercube* ( $n=2$ ,  $m=10$ ) : a) *Classic* et b) *Optimal*

Enfin, dans une étude présentée par [ALAM *et al.* 04], il était montré que le plan LH optimal offre des bons compromis en générant des échantillons efficaces permettant de capturer la plupart des non-linéarités de l'espace de conception tout en utilisant un nombre restreint de configurations.

## 3.2 Méthodes d'approximation

### 3.2.1 Régression polynômiale

La méthode de régression polynômiale pour la construction des surfaces de réponse utilise des polynômes de degrés quelconques pour approximer les données à modéliser. Dans l'espace de  $n$  variables aléatoires, le modèle de régression polynômiale s'écrit :

$$F_a(\mathbf{X}) = a + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{i=1}^n c_i x_i^2 + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n d_{ij} x_i x_j + \dots \quad (2.8)$$

Les coefficients des polynômes  $a$ ,  $b_i$ ,  $c_i$ ,  $d_{ij}$ , etc. sont généralement obtenus avec la méthode des moindres carrés. Pour un modèle de Régression Polynomiale Quadratique (RPQ) (polynômes de degré 2), le nombre minimal de réalisations (échantillons) nécessaire est ([RGUIG 05]) :

$$N_{min} = \frac{(n+1)(n+2)}{2} \quad (2.9)$$

### 3.2.2 Réseau de neurones de fonctions à base radiale

L'approximation par les fonctions à base radiale (Radial Basis Function (RBF)) est une généralisation de la méthode d'approximation par les fonctions multiquadratiques développée par Hardy en 1971 [HARDY 71]. L'objectif est de trouver des fonctions continues permettant de modéliser des cartes topographiques précises à partir des données en des points connus. Les possibilités de cette technique ont été étendues par la suite pour les interpolations multi-variables [POWEL 85].

Une fonction à base radiale est une fonction  $\Phi_j$  symétrique dont la valeur dépend de la distance par rapport à l'origine,  $\Phi_j(x) = \Phi_j(\|x\|)$ , ou éventuellement par rapport à un centre  $\mu_j$ ,  $\Phi_j(x) = \Phi_j(\|x - \mu_j\|)$ . La norme est souvent une distance Euclidienne ( $r = \|x - \mu_j\|$ ).

Les réseaux de neurones sont constitués d'éléments simples (neurones) fonctionnant en parallèle. Ces éléments sont inspirés du système nerveux biologique. Les neurones formels qui sont une abstraction des neurones physiologiques ont été présentés par W. McCulloch et W. Pitts en 1943 [MCCULLOCH & PITTS 43].

Un réseau de fonctions à base radiale [PARK & SANDBERG 91] est un réseau de neurones artificiels qui permet de calculer une combinaison linéaire de fonctions à base radiale de centres  $\mu_j$ .

Pour un vecteur d'entrée  $\mathbf{X} = [x_1, x_2, \dots, x_n]$ , ( $1 \leq i \leq n$ ) et pour  $m$  centres  $\mu_j$ , ( $1 \leq j \leq m$ ), une réponse  $F_a(\mathbf{X})$  s'écrit :

$$F_a(\mathbf{X}) = \sum_{j=1}^m \omega_j \cdot \Phi_j(\|\mathbf{X} - \mu_j\|) \quad (2.10)$$

Avec  $\omega_j$  ( $1 \leq j \leq m$ ,) : les coefficients (poids) à déterminer pour avoir la surface de réponse  $F_a$ .

En notation matricielle, on a :

$$\mathbf{F}_a = \mathbf{A} \cdot \mathbf{C} \quad (2.11)$$

Avec  $F_a(\mathbf{X}) = [F_a(x_1), F_a(x_2), \dots, F_a(x_n)]^T$ ,  $A_{ij} = \Phi_j(\|x_i - \mu_j\|)$  et  $\mathbf{C} = [\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m]^T$ . Les coefficients de la matrice  $\mathbf{C}$  sont calculés par :

$$\mathbf{C} = \mathbf{A}^{-1} \cdot \mathbf{F}_a \quad (2.12)$$

La figure 2.5 schématise un réseau RBF ayant  $m$  centres pour calculer une fonction  $F_a(\mathbf{X})$ .

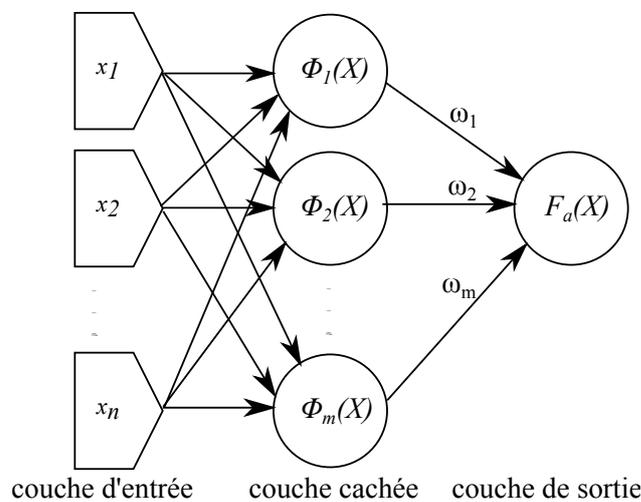


FIGURE 2.5 – Réseau de neurones de fonctions à base radiale

Le tableau 2.1 présente quelques fonctions  $\Phi$  à base radiale.

Les réseaux de neurones RBF sont utilisés aujourd'hui dans divers domaines : la géodésie, les Modèles Numériques de Terrains (MNT), le traitement de signal, le traitement d'images, la reconnaissance des formes, des visages et des voix, les systèmes de contrôle, la résolution des équations différentielles aux dérivées partielles (PDE), etc. Pour la résolution des PDEs, les méthodes basées sur les RBFs offrent la possibilité de résoudre des problèmes sans passer par les maillages (meshless), ce qui constitue un gain important sur le temps de calcul [BUHMANN 04].

Nom	$\Phi(r)$ , $r = \ x - \mu_j\ $	Paramètres
Gaussienne	$e^{-(h.r)^2}$	$h > 0$
Multi-quadratique	$\sqrt{r^2 + h^2}$	$h > 0$
Quadratique inversée	$\frac{1}{r^2+h^2}$	$h > 0$
Multi-quadratique inversée	$\frac{1}{\sqrt{r^2+h^2}}$	$h > 0$
Spline polyharmonique	$\Phi(r) = r^k$	$k = 1, 3, 5, \dots$
	$r^k \cdot \ln(r)$	$k = 2, 4, 6, \dots$
Spline plaque fine	$r^2 \cdot \ln(r)$	

TABLE 2.1 – *Quelques fonctions à base radiale*

### 3.2.3 Krigeage

Le Krigeage (Kriging<sup>1</sup>) [KRIGE 51] est une technique d'interpolation spatiale issue de la géostatistique. Sa théorie mathématique a été développée par le mathématicien et le géologue Français Georges Matheron [MATHERON 62] et [MATHERON 63]. Récemment, le Krigeage a été utilisé comme une technique de méta-modélisation [SASENA 02] et [BEERS 05] dans diverses applications telles que la construction des surfaces de réponse à partir des processus de simulation numérique pour l'optimisation des formes aérodynamiques [LAURENCEAU 08].

La valeur d'une variable de conception en un point quelconque est calculée par une somme pondérée des valeurs de simulation aux points disponibles. Les coefficients de pondération sont choisis de façon à ce que cette interpolation soit sans biais et à variance minimale. En statistique, un biais est un écart entre la vraie valeur d'une variable inobservable et la valeur estimée statistiquement. Dans notre cas d'application, elle correspond à un écart entre la valeur calculée par le processus de simulation et la valeur donnée par la surface de réponse. Le Krigeage est qualifié d'interpolateur exact, en effet, la surface de réponse coïncide avec le processus de simulation aux points choisis pour la construction de la surface de réponse.

La méthode de méta-modélisation par Krigeage consiste à modéliser le processus de simulation  $F$  au moyen d'une régression qui s'écrit sous la forme :

$$F(\mathbf{X}) = F_a(\mathbf{X}) + Z(\mathbf{X}) = \sum_j \omega_j \cdot f_j(\mathbf{X}) + Z(\mathbf{X}) = f(\mathbf{X}) \cdot \omega^T + Z(\mathbf{X}) \quad (2.13)$$

avec  $f(\mathbf{X})$  est un vecteur de fonctions servant de base de régression (généralement de type polynômes) et  $\omega = [\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m]$  le vecteur des coefficients à identifier. Le

---

1. Daniel Gerhardus Krige : Ingénieur minier sud-africain

terme  $Z(\mathbf{X})$  représente le résidu entre  $F$  et  $F_a$ . Les hypothèses du Krigeage font que la moyenne de  $Z(\mathbf{X})$  est nulle et que la variance  $\sigma^2$  est stationnaire. Ce qui signifie que si la valeur de  $F$  est connue en un point de simulation  $x_i$ , sa valeur en un point  $x_k$  ne dépend que de la norme  $|x_i - x_k|$  entre les deux points  $x_i$  et  $x_k$ . Cela permet d'écrire [LAURENCEAU 08] :

$$Cov_Z(x_i, x_k) = \sigma^2.R(|x_i - x_k|) \quad (2.14)$$

Avec  $R$ , la fonction de corrélation qui ne dépend que de  $|x_i - x_k|$ . Cette fonction est choisie par l'utilisateur et elle est généralement de type Gaussienne [PICHENY 09] :

$$R(x_i, x_j) = R(|x_i - x_j|) = e^{-\left(\sum_k \theta_k |x_{i,k} - x_{j,k}|^2\right)} \quad (2.15)$$

Les paramètres  $\theta_k$ ,  $\sigma^2$  et  $\omega_j$  sont à identifier par l'une des techniques d'optimisation telles que le maximum de vraisemblance [BOX & DRAPER 07].

Dans cette thèse, deux techniques de méta-modélisation ont été utilisées : la régression polynomiale et les réseaux de neurones de fonctions à base radiale (RBF). La première a été choisie car elle a l'avantage de fournir des méta-modèles faciles à inter-changer entre les outils de modélisation. La deuxième présente une meilleure précision pour les problèmes non-linéaires [JIN *et al.* 01].

Après avoir présenté la méthode de méta-modélisation par approximation, il est intéressant de montrer comment peut-on intégrer cette approche dans un contexte global de conception des systèmes mécatroniques et comment cette approche permet de répondre aux attentes de la conception mécatronique en terme d'interopérabilité et d'optimisation multi-disciplinaire.

## 4 Proposition d'une approche de conception mécatronique

En l'absence d'un outil de conception capable d'assurer tout le processus de conception d'un système mécatronique, la conception est effectuée pratiquement sur des plateformes qui permettent de gérer les interactions entre les logiciels de modélisation, d'analyse et d'optimisation.

L'objectif de cette partie est de proposer une approche de conception mécatronique basée sur une plateforme intégrée de conception. Cette approche doit être à la fois collaborative, assurant l'interopérabilité et permettant l'optimisation multi-disciplinaire.

Dans cette approche nous proposons d'itérer le processus de conception sur un nombre de niveaux de conception de degré de détail croissant.

Pour illustrer la démarche, nous nous limitons à trois niveaux :

- préconception (ou conceptuel)
- conception préliminaire,
- conception détaillée.

Dans chaque niveau, un système de métriques doit être établi, ce qui permet d'évaluer : la faisabilité du système en préconception, le degré de satisfaction des solutions en conception préliminaire et la validation de toutes les exigences en conception détaillée.

Notre choix de centrer la conception autour des métriques permet, comme il sera montré dans cette partie, de faciliter la conception collaborative, l'interopérabilité et l'optimisation de la conception.

D'une façon générale, les métriques sont des mesures qui permettent d'évaluer la progression d'un processus (ou d'un projet), par l'observation de changements des valeurs de mesures [DoD 01].

En ce qui concerne la conception d'un système mécatronique, on s'intéresse aux métriques liées au produit à concevoir. Ces métriques permettent, durant le cycle de développement du produit, de quantifier et de mesurer le progrès d'avancement vers l'atteinte des exigences des clients. Selon [DoD 01], ces métriques sont de trois types :

- métriques de performance : pour mesurer la performance du produit ;
- métriques de pertinence ('suitability') : pour mesurer la sécurité, la maintenabilité, la fabricabilité, la modularité, etc. ;
- métriques d'accessibilité ('affordability') : mesurer les coûts.

L'utilité des données relatives aux métriques est plus grande si ces données sont disponibles au haut niveau de conception, à travers des modèles mathématiques fiables et la simulation numérique. Mais ce n'est pas toujours évident, d'où l'importance de mettre en avant-phase le retour d'expérience, provenant généralement des études précédentes, mais aussi des analyses locales par simulation utilisant des codes de calcul de haute fidélité.

Pour cela, on a choisi de répartir les métriques sur les différents niveaux de conception : métriques conceptuelles, métriques de conception préliminaire et métriques de conception détaillée. Les métriques conceptuelles sont déduites des exigences (clients ou systèmes). Les autres métriques sont induites du processus de conception lui-même. Les exigences seront ainsi introduites dans le processus de conception

progressivement, de manière à mettre en phase amont de conception les exigences globales (exemple : performance) et en phase avale les exigences techniques induites du processus de conception.

Pour chaque niveau de conception, une procédure d'ingénierie système, telle que celle définie par la norme ISO/IEC-15288 [IEEE 04], pourrait donc être appliquée. Chaque niveau est ainsi constitué de quatre phases de modélisation :

- E : définition des exigences ;
- F : modélisation fonctionnelle ;
- L : modélisation logique ;
- P : modélisation physique et développement.

Ces quatre phases sont présentées sur le cycle en V, donné par la figure 2.6

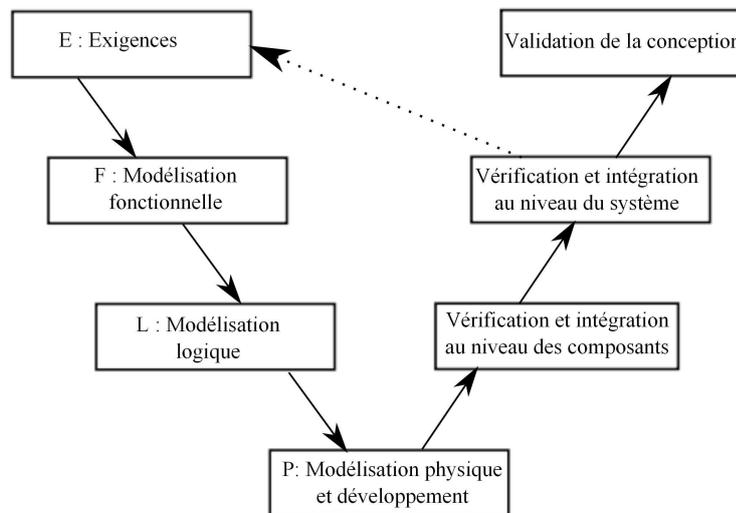


FIGURE 2.6 – Cycle en V de conception mécatronique

Les phases de Vérification, Intégration et Validation (VIV), représentées également sur le cycle en V, sont effectuées à chaque niveau de conception. La flèche en pointillé sur la figure indique le retour au début du processus de conception pour commencer le niveau suivant de conception. Elle indique aussi un retour d'expérience qui va alimenter le niveau suivant avec des nouvelles informations et des nouvelles exigences induites.

Ainsi, en repartant les quatre phases de modélisation sur les trois niveaux de conception, on aura douze phases de modélisation qui sont données dans le tableau 2.2.

Le processus de conception d'un système mécatronique est alors schématisé par le cycle en spiral (figure 2.7). Le point de départ du processus est le Cahier des Charges

Niveau	Exigence	Fonctionnel	Logique	Physique
Préconception	E3	F3	L3	P3
Conception préliminaire	E2	F2	L2	P2
Conception détaillée	E1	F1	L1	P1

TABLE 2.2 – *Niveaux de conception*

(CC) et le point final est la validation et l'acceptation de la conception.

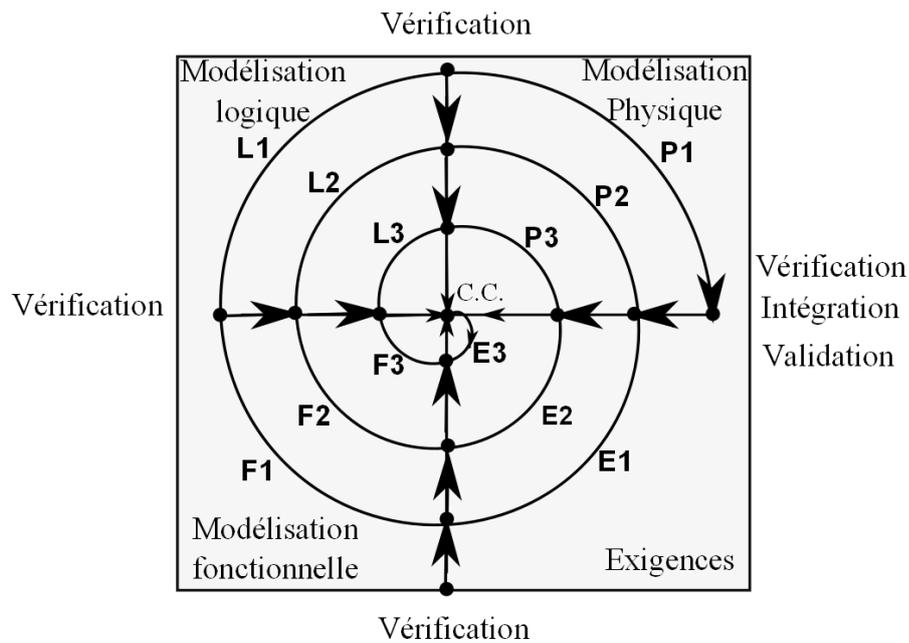


FIGURE 2.7 – *Cycle de conception en spirale*

Le processus de conception adopté est semblable au processus itératif d'apprentissage par expérimentation (figure 2.8), constitué essentiellement d'une succession répétitive de la séquence [BOX & DRAPER 07] : Conjecture- Conception - Expérimentation- Analyse.

Dans notre contexte, l'expérimentation physique sera remplacée par des simulations numériques.

Le fait de décomposer la conception en trois niveaux et quatre phases permet une progressivité dans la maturité de la conception tout en maîtrisant la complexité du problème.

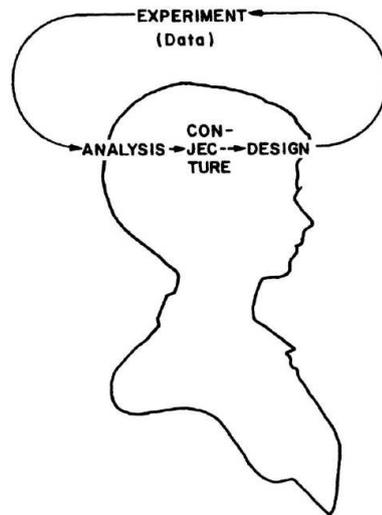


FIGURE 2.8 – *Processus itératif d'apprentissage* [BOX & DRAPER 07]

Pour maîtriser encore mieux cette complexité, il sera intéressant de décomposer le problème en sous-problèmes cohérents [BATILL *et al.* 99] et d'identifier les interfaces des différents sous-problèmes. Ainsi deux types d'interfaces peuvent être identifiés. Le premier type concerne les interfaces entre les sous-systèmes du système mécatronique. Ceci va permettre d'identifier dès le niveau conceptuel les variables d'entrée et de sortie de chaque sous-système à modéliser. Les sous-systèmes peuvent être eux-mêmes des systèmes mécatroniques (un système ABS dans une voiture par exemple). Le deuxième type d'interfaces est celui entre les disciplines, qui permet de bien répartir les tâches de conception entre les équipes multi-disciplinaires suivant leur domaine de spécialité et de leur affecter les outils de conception convenables.

Étant donné que certains outils de modélisation sont multi-disciplinaires, il sera aussi possible que le deuxième type d'interface soit défini entre les outils de modélisation. De cette manière, au lieu d'échanger des modèles entre les logiciels de modélisation, on n'échange que des données sous forme de variables d'entrée et de sortie.

Les variables de sortie sont les variables d'intérêt que l'on cherche à évaluer et qui peuvent être en liaison avec les métriques d'évaluation. Ce sont généralement les variables de sortie d'un processus de simulation.

Les variables d'entrée peuvent être de deux types, les variables d'environnement et les variables de contrôle.

Les variables d'environnement sont, par exemple, les variables physiques ou géométriques qui caractérisent l'objet à modéliser. Leurs valeurs sont soit fixées par le

cahier des charges, soit à identifier durant les processus de simulations et d'optimisation.

Les variables de contrôle sont les variables fixées par l'utilisateur de l'objet à modéliser pour atteindre divers objectifs. Ils peuvent également être identifiées par simulations ou par optimisation.

Dans certains problèmes de modélisation, une variable peut jouer le rôle d'une variable d'entrée et de sortie. A titre d'exemple, le couple fourni par une machine électrique est considéré comme une variable de sortie dans le cas où la machine est motrice et il devient une variable d'entrée dans le cas où la même machine est génératrice. Ce type de problème nécessite l'emploi d'un outil de modélisation qui supporte la modélisation non-causale tel que Modelica.

Par ailleurs, il est intéressant de distinguer entre trois types de variables, les variables publiques (Pu) ou globales (G) qui sont partagées par divers outils de modélisation (ou diverses disciplines), les variables privées (Pr) ou locales (L) qui sont spécifiques à un seul outil (ou à une discipline) et les variables de couplages (C) qui assurent l'interface entre les sorties de certaines disciplines (ou outils de modélisation) et les entrées des autres disciplines.

Une autre manière de séparer ces variables peut aussi être considérée. Les variables globales sont associées aux variables partagées par plusieurs sous-ensembles et composants du système mécatronique, les variables locales qui sont spécifiques à un seul composant ou sous-ensemble et les variables de couplage entre les sous-ensembles et les composants.

La continuité du processus de conception mécatronique sera donc établie en assurant les liens entre les variables de conception et les métriques d'évaluation aux différents niveaux de conception, et les liens entre les métriques des différents niveaux.

Toutefois, l'effort des concepteurs sera l'établissement de ces liens entre métriques et variables ainsi que le choix des critères selon lesquels il seront définis les trois types de variables de conception (G, L ou C).

Pour illustrer cet exposé, nous considérons un cas de conception mécatronique constitué de trois interfaces (figure 2.9). Comme on l'a déjà indiqué, les interfaces peuvent être définies suivant une décomposition architecturale du système (les sous-ensembles) ou suivant les outils de modélisation ou suivant les disciplines. Dans cet exemple, nous considérons que les interfaces sont définies suivant une décomposition architecturale.

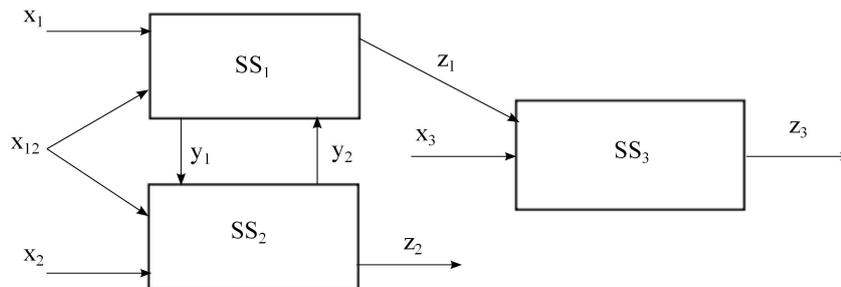


FIGURE 2.9 – *Système mécatronique à trois sous-systèmes*

Le système mécatronique est ainsi constitué de trois sous-ensembles ( $SS_1$ ,  $SS_2$  et  $SS_3$ ). Les variables  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_{12}$  et  $x_3$  sont des variables d'entrée. Les variables  $x_1$ ,  $x_2$  et  $x_3$  sont des variables locales. La variable  $x_{12}$  est une variable globale ou partagée. Les variables  $z_2$  et  $z_3$  sont des variables de sortie. La variable  $z_1$  est une variable de sortie par rapport à  $SS_1$  et une variable d'entrée par rapport à  $SS_3$ . Les variables  $y_1$ ,  $y_2$  et  $z_1$  sont des variables de couplage. Les variables  $z_1$ ,  $z_2$  et  $z_3$  dépendent des variables d'entrée de la façon suivante :  $z_1 = F_1(x_1, x_2, x_{12}, y_2)$ ,  $z_2 = F_2(x_{12}, x_2, y_1)$  et  $z_3 = F_3(x_3, z_1)$ .

La définition des variables de conception s'effectue durant le processus de conception en utilisant un outil de modélisation système où seront pris en considération les variables qui sont en relation avec les métriques d'évaluation des exigences aux différents niveaux de conception. Les autres variables de conception seront définies dans leurs modèles avec les outils de conception appropriés.

## 4.1 La préconception

La préconception est une phase de conception constituée des phases E3-F3-L3-P3 qui a pour but de fournir un support permettant la prise de la décision sur la faisabilité du système avant de passer à la conception préliminaire. Les résultats de cette étape sont un ensemble d'architectures génériques (fonctionnelles, logiques et physiques) du système avec un ensemble de métriques permettant l'évaluation du degré de faisabilité du système.

Suite à une phase d'analyse des exigences clients, définies dans un cahier des charges, le but de la phase de définition des exigences systèmes E3, est de fournir une vue technique du produit à concevoir en n'insistant que sur les exigences génériques qui pourront mettre en cause la faisabilité du système. Ces exigences sont traduites en des métriques de niveau global qui seront évaluées durant cette étape de conception. Suivant une approche de conception "Top-Down", la modélisation fonctionnelle F3

permet, à partir des exigences systèmes, de définir les limites fonctionnelles du système en terme de comportement et propriétés souhaitées.

La modélisation logique E3 permet de définir des entités logiques à partir des fonctions systèmes établies, pour les organiser en une architecture logique qui aide à choisir les éléments physiques par la suite. L'architecture logique permet également de mettre en évidence les échanges d'énergies et des signaux entre les éléments du système.

La modélisation physique P3 permet de définir, à partir de la structure logique, l'architecture physique qui correspond à une description hiérarchique des éléments qui composent le système. Cette hiérarchie commence avec le haut niveau du système et progresse vers le bas pour les éléments qui composent chaque composant intermédiaire. L'objectif n'est pas la conception détaillée des composants, mais plutôt des représentations génériques des composants permettant de modéliser les performances du système et d'assurer un lien avec le processus de décomposition des exigences (voir [BUEDE 09]). Les résultats sont des schémas (méta-modèles) souvent sous forme de diagrammes qui montrent les échanges d'énergie et d'information entre les composants du système. Le degré de faisabilité du système est déterminé en évaluant les métriques en liens avec les exigences. Les modèles d'évaluation des métriques sont de formes mathématiques simples, telles que des équations algébriques, sans équations différentielles.

Toutes les phases de modélisation de l'étape préconception peuvent être effectuées avec le langage de méta-modélisation SysML. La vérification et le validation de la modélisation peuvent être assurées tout simplement des outils tels que le tableur "Excel" ou un programme capable de résoudre un système d'équations algébriques tels que Matlab ou Modelica.

## 4.2 La conception préliminaire

L'étape de conception préliminaire est constituée des phases E2-F2-L2-P2. Dans cette étape, les architectures génériques établies dans la phase précédente sont complétées avec les caractéristiques de performance de chaque élément dans un degré nécessaire pour la modélisation des performances du système.

Les phases E2-F2-L2 seront ainsi une continuité des phases E3-F3-L3 avec un niveau supérieur de granularité et de précision. Par conséquent, ces phases peuvent être effectuées avec le langage SysML.

La phase P2 sera constituée de deux parties : une sous-phase de méta-modélisation, avec SysML, pour assurer la continuité avec la phase P3 ; et une sous-phase de modélisation pour développer les modèles simulables. Cette dernière, pourrait être effectuée avec un outil de modélisation multi-domaine tel que Modelica. Les modèles

mathématiques utilisés sont de niveaux plus précis, tels les ODEs et DAEs.

### 4.3 La conception détaillée

La conception détaillée a pour objectif de définir tous les supports nécessaires à la phase de production du système tout en gardant une traçabilité avec les autres phases de conception. Des analyses multi-physiques des composants sont nécessaires. Ainsi, une validation de tout le système doit être effectuée en mettant à jour les métriques d'évaluation déjà prédéfinies. Étant donné que la conception est gérée par des variables (d'entrée et de sortie), il n'est pas nécessaire de déclarer toutes les variables de conception en niveau de définition des exigences car elles sont nombreuses, mais seulement celles qui interviennent dans la validation du système. Les autres variables, telles que les dimensions ou autres caractéristiques physiques, seront stockées avec leurs modèles physiques détaillés.

Dans la phase E1, seront considérées des exigences systèmes (ou composants) de niveau détaillé, qui peuvent être induites suite à un choix préalable d'une technologie ou d'une solution. Ces exigences peuvent concerner des durées de vie ou des marges de sécurité des éléments critiques ou sensibles qui peuvent affecter le fonctionnement de tout le système. Des métriques sont ainsi déduites de ces exigences pour être évaluées et vérifiées durant la phase de conception détaillée.

La phase de modélisation fonctionnelle F1 est semblable aux deux étapes précédentes. En partant des exigences, on définit les fonctions et l'environnement des éléments à concevoir. Bien entendu, il s'agit de mettre à jour l'architecture fonctionnelle déjà initiée avec les nouvelles fonctions de niveau détaillé

L'architecture logique au niveau L1 est également mise à jour en lui ajoutant des nouvelles entités logiques issues des nouvelles fonctions.

La phase de modélisation physique P1 est la phase la plus coûteuse de point de vue temps de développement.

Comme dans la phase P2, la phase P1 sera constituée de deux sous-phases : une sous-phase de méta-modélisation "Top-Down" et une phase de modélisation "Bottom-up".

La sous-phase de méta-modélisation de P1 permet de préparer l'architecture physique des solutions à détailler dans la deuxième sous-phases. Par conséquent, elle permet d'assurer une continuité avec les phases de méta-modélisation de P3 et P2. La deuxième sous-phase "Bottom-Up" a pour but de définir la géométrie des composants et des sous-ensembles. Les modèles physiques de ces composants peuvent également être sélectionnés à partir des bibliothèques standards ou spécifiques à la

société.

Ainsi, les composants mécaniques sont conçus avec la CAO 3D mécanique, les cartes électroniques avec la CAO électronique, les codes de contrôle sont générés avec des outils informatiques, etc. Ces outils de modélisation proposent en général des techniques de vérification qui vont avec les modèles. Ainsi, des simulations par éléments finis sont réalisées pour les problèmes multi-physiques ; des outils de simulation électronique sont également utilisés pour vérifier les cartes électroniques. Pourtant, ces vérifications sont effectuées d'une manière séparée ce qui ne permet pas d'appréhender l'effet d'intégration de l'ensemble du système et les problèmes qui peuvent apparaître au niveau des interfaces.

La solution qui est retenue dans cette thèse pour assurer cette intégration, est la technique de méta-modélisation par approximation. En effet, on propose de générer à partir des simulations effectuées sur les modèles locaux dans la phase de conception détaillée (P1) ou même préliminaire (P2), des modèles approximés avec un niveau de précision suffisant. Ayant une forme mathématique simple, ces méta-modèles peuvent être intégrés aux modèles physiques du système mécatronique aux différents niveaux de conception (P3, P2 et P1). Ceci permet d'assurer une continuité de conception entre les différents niveaux et d'avoir au niveau P1, un modèle physique de système mécatronique qui prend en compte le comportement des composants modélisés en niveau détaillé (P1) avec différents logiciels de conception. Dans le même niveau de conception P1, il est également possible d'associer plusieurs méta-modèles pour supprimer la dépendance des outils de calcul si le processus de simulation devient coûteux en temps de calcul.

En parallèle sur le modèle d'ingénierie système, une traçabilité est assurée entre les métriques et les variables de conception des différents niveaux de conception.

Le travail collaboratif est assuré en mettant en place un système d'information qui permet la communication entre les collaborateurs et les outils de modélisation utilisés. Ce système de communication peut exploiter le modèle d'ingénierie système pour récupérer les valeurs des métriques et des variables de conception et les communiquer aux concepteurs. Chaque collaborateur peut ainsi agir suivant ces évolutions pour tenir compte des modifications.

Vue que la conception est organisée autour des métriques et des variables de conception à échanger entre les modèles et les outils de modélisation, ceci permet de faciliter le processus d'optimisation à la fois des composants, des sous-systèmes et du système entier aux différents niveaux de conception.

## 4.4 Proposition d'une plateforme logicielle de conception intégrée

Pour illustrer cette approche, nous proposons une plateforme logicielle de conception mécatronique constituée de divers outils de modélisation et de simulation (figure 2.10).

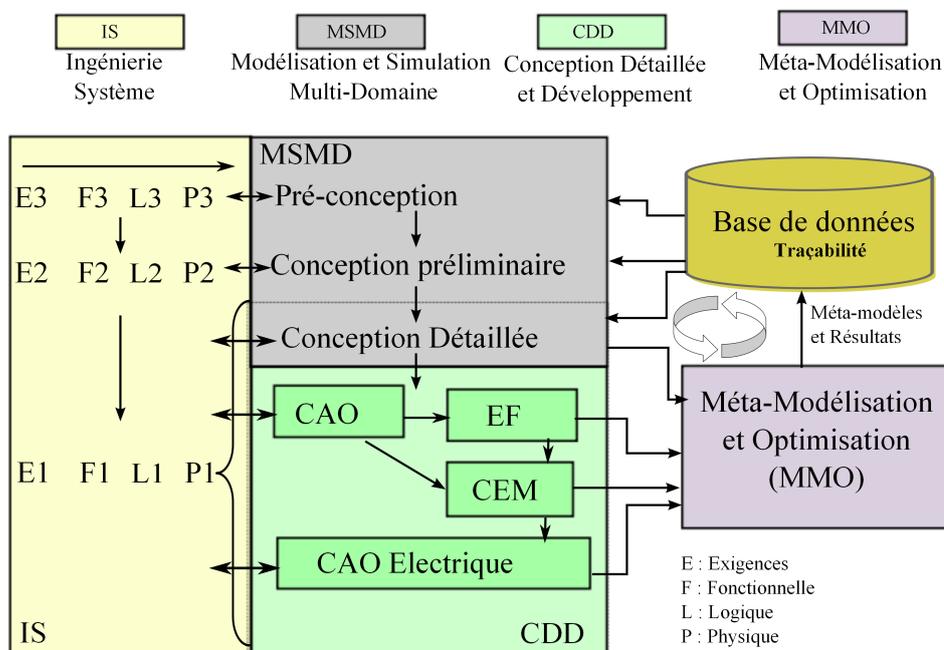


FIGURE 2.10 – Exemple de plateforme de conception mécatronique

Pour pouvoir créer les méta-modèles, un environnement de Méta-Modélisation et Optimisation (MMO) multi-disciplinaire, tel qu'iSIGHT<sup>2</sup>, est nécessaire pour : la définition des processus de simulation en couplant divers simulateurs ; la construction des méta-modèles et la définition des processus d'optimisation sur les méta-modèles ou directement sur les processus de simulation.

Nous proposons également d'ajouter une bibliothèque (ou une base des données) pour les méta-modèles établis, ces méta-modèles seront ainsi utilisés dans différents niveaux de vérification du système mécatronique.

2. <http://www.simulia.com/products/isight.html>

Suivant un processus de conception "Top-Down", un outil d'ingénierie système (IS) tel que SysML permet de supporter la modélisation des différentes phases (E3, E2, E1, F3, F2, F1, L3, L2 et L1). Pour la modélisation physique, SysML ne supporte que la modélisation architecturale physique 0D (P3).

Ainsi, la phase P3 peut être supportée par SysML avec un outil de Modélisation et Simulation Multi-Domaine (MSMD) tels qu'Excel ou Modelica pour évaluer les métriques pour les différentes architectures physiques possibles du système. Les modèles des métriques peuvent être récupérés de la base des données des méta-modèles s'ils ont été déjà établis dans de précédentes études, sinon il faut les établir avec l'une des techniques de modélisation (analytique ou numérique). Certains outils d'ingénierie système basé sur les langages UML/SysML tel que Artisan Studio<sup>3</sup> offre la possibilité d'évaluer<sup>4</sup> directement les modèles SysML avec Modelica, Simulink ou Excel.

La phase P2 est également partagée entre l'outil d'IS et le logiciel de vérification, qui correspond dans ce cas à un outil MSMD, pour la vérification de l'architecture retenue dans la phase précédente (P3). Cette vérification concerne par exemple le comportement du système physique avec sa partie contrôle. Les modèles à simuler peuvent être construits soit directement en partant des composants de l'outil multi-domaine, soit en enrichissant le modèle déjà retenu dans la phase P3 sous SysML, soit en récupérant des modèles de l'outil d'IS au format d'échange XMI pour les exportes vers l'environnement MSMD, ou en combinant ces différentes possibilités. En appliquant la technique de méta-modélisation par approximation aux simulations à ce niveau (P2), des modèles empiriques peuvent être extraits. Ces modèles correspondent par exemple à la variation d'un critère de performance en fonction de quelques grandeurs de conception du système. Ces modèles peuvent être utilisés pour l'optimisation des paramètres de conception, ou être transférés à l'outil d'IS pour assurer la traçabilité avec d'autres métriques d'évaluation qui ne sont disponibles que dans l'outil d'IS tels que le coût ou la Sureté De Fonctionnement (SDF) du système. Ces modèles peuvent également être stockés dans la base des données pour des utilisations ultérieures.

Dans la phase P1, le logiciel de CAO mécanique peut communiquer avec l'outil d'IS par échange des données en format XMI par exemple. La vérification du modèle CAO est effectuée avec un outil d'analyse par éléments finis. Pour pouvoir valider l'effet de la géométrie sur le comportement dynamique du système dans

---

3. <http://www.atego.com/products/artisan-studio/>

4. <http://www.atego.com/products/artisan-studio-parasolver/>

l'environnement MSMD, il est possible d'extraire un modèle par la technique de méta-modélisation par approximation et de l'ajouter au modèle du système mécatronique dans le logiciel multi-domaine.

Le modèle approximé peut également être ajouté à la bibliothèque des méta-modèles ou à l'outil d'ingénierie système comme un modèle empirique permettant d'évaluer une métrique quelconque. Ceci est très pratique dans ce cas, car il est souvent difficile de trouver le modèle d'une métrique qui dépend de la géométrie.

Des outils d'analyse de CEM, tels que Ansys Q3D Extractor<sup>5</sup> ou Inca3D<sup>6</sup>, peuvent être employés pour générer des modèles compacts de CEM, à partir des modèles géométriques en utilisant des techniques de réduction de modèles. Ces modèles compacts peuvent être insérés dans un simulateur électrique. En appliquant la même technique de méta-modélisation par approximation, on récupère également des méta-modèles électriques qu'on peut l'ajouter à la simulation au niveau système mécatronique.

Il est possible de coupler, dans l'environnement MMO, divers outils de modélisation et de simulation tels qu'un logiciel de CAO mécanique, un logiciel de calcul CEM, un logiciel de simulation électrique et un logiciel de calcul par éléments finis, pour définir un processus de simulation multi-physique. Un exemple de couplage multi-physique a été présenté par [HAMMADI *et al.* 11] dans un but d'optimiser la disposition des composants électroniques dans un module de puissance. Il est possible d'utiliser sur ces processus de simulation, la technique de méta-modélisation par approximation pour définir des surfaces de réponse pour faire des optimisations multi-physiques et multi-disciplinaires ou juste avoir des modèles approximés permettant la vérification des exigences au niveau du système.

A la fin du processus de conception, les concepteurs disposent de trois types de modèles, les premiers sont des modèles d'ingénierie système qui ont évolué sur trois étapes de conception (préconception, conception préliminaire et conception détaillée). Le deuxième type concerne des modèles pour la simulation multi-domaine qui ont évolué sur deux étapes (conception préliminaire et conception détaillée). Le troisième type de modèles sont les différents modèles élaborés au niveau de la conception détaillée.

---

5. [http://www.ansoft.com/products/si/q3d\\_extractor/](http://www.ansoft.com/products/si/q3d_extractor/)

6. <http://www.cedrat.com/en/software-solutions/inca3d.html>

## 5 L'optimisation multi-disciplinaire avec l'approche proposée

Une optimisation multi-disciplinaire (Multi-Disciplinary Optimization (MDO)) ne se limite pas à un simple problème d'optimisation. Car pour assurer une telle optimisation, on doit résoudre au préalable tous les problèmes liés à la conception collaborative et à l'interopérabilité des outils de modélisation.

Devant ces problèmes, on se trouve souvent avec plusieurs fonctions "objectifs" ayant plusieurs solutions, connues sous le nom de solutions optimales de Pareto. Le but de l'optimisation multi-objectif est de trouver un compromis entre les objectifs plutôt qu'une seule solution optimale.

Plusieurs travaux de recherche ont montré l'avantage de l'utilisation des méta-modèles pour résoudre les problèmes d'optimisation multi-disciplinaire et multi-objectif.

[ALEXANDROV & ROBERT 00] ont présenté une étude sur le 'design' collaboratif dans laquelle ils ont montré l'importance des méta-modèles pour réduire l'indépendance de l'optimisation multi-disciplinaire des codes coûteux en temps de calcul. Par ailleurs, [ALTUS 02] a présenté une méthodologie se basant sur l'utilisation des surfaces de réponse avec la méthode 'Bi-Level Integrated System Synthesis (BLISS)' pour les problèmes d'optimisation multi-disciplinaire. BLISS [SOBIESKI 88] est une méthode pour l'optimisation par décomposition de systèmes d'ingénierie. Elle sépare l'optimisation au niveau système, ayant un nombre relativement restreint de variables globales de conception, des nombreuses sous-optimisations qui peuvent avoir chacune un grand nombre de variables locales de conception. Les sous-optimisations sont autonomes et peuvent être menées simultanément par une analyse de la sensibilité globale (Global Sensivity Equations (GSE)) [SOBIESKI 91]. Dans la méthodologie présentée par [ALTUS 02] la GSE est remplacée par les surfaces de réponse.

Une autre méthode qui se base sur la combinaison des méta-modèles avec la méthode BLISS a été présentée par [MASMOUDI & PARTE 06] et qui correspond à la méthode 'Disciplinary Interaction Variable Elimination (DIVE)'. Elle remplace la GSE du BLISS par une méthodologie d'élimination des variables de conception. Les variables locales sont remplacées par des méta-modèles.

Les méta-modèles sont déjà largement utilisés pour l'optimisation globale des composants dans le domaine de la conception aéronautique. [SHYY *et al.* 01] ont montré l'avantage de cette technique pour l'optimisation géométrique de certains

composants tels que l'aile d'avion et les turbines supersoniques.

Dans le domaine de l'optimisation multi-objectif, [GOEL *et al.* 07] ont présenté une méthode pour l'approximation des fronts de Pareto optimaux avec des surfaces de réponse.

Dans une autre étude, [LIANG *et al.* 11] ont utilisé les méta-modèles comme support pour la conception robuste avec la méthode  $6\sigma$  pour l'optimisation multi-objectif de l'aile d'un avion.

De notre côté, l'approche proposée permet d'assurer l'optimisation multidisciplinaire à plusieurs niveaux. Un niveau d'optimisation globale qui correspond au niveau système et qui permet d'assurer la réalisation de la conception selon les objectifs globaux. Le deuxième niveau d'optimisation correspond au niveau local, mais dans ce cas les disciplines participent au choix des solutions locales en agissant sur les variables mises en commun en niveau global.

L'utilisation de la technique de méta-modélisation par approximation permet de substituer les codes de calcul, généralement coûteux en temps de calcul. Suivant le besoin plusieurs méta-modèles locaux peuvent remplacer les modèles coûteux. Le problème global d'optimisation peut être défini avec un processus global de simulation construit à partir des méta-modèles locaux. Dans le cas où ce processus est lui même coûteux en temps de calcul, il est aussi possible de définir un méta-modèle global qui représente alors tout le processus de simulation. Ceci permet de résoudre le problème d'interopérabilité entre les codes de simulation pendant l'optimisation.

## 6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté une approche intégrée de conception mécatronique basée sur l'utilisation d'une plateforme constituée de divers outils de modélisation et de simulation, couvrant les différentes phases de conception mécatronique, depuis la préconception jusqu'à la conception détaillée. La technique de méta-modélisation par approximation a été choisie pour l'extraction à partir des simulations multi-physiques et multi-domaines de modèles intégrables à différents niveaux de conception et différents outils de modélisation. Nous avons montré qu'il est possible d'intégrer ces modèles dans des outils d'analyse multi-domaines des systèmes mécatroniques, mais aussi dans des outils de modélisation en ingénierie système pour la vérification des exigences. Le modèle d'ingénierie système est élaboré progressivement suivant une approche basée sur les métriques et les variables de conception.

Ces modèles nous permettent enfin d'effectuer des optimisations multi-disciplinaires et multi-objectifs à différents niveaux de conception.

Dans le chapitre suivant, nous validerons cette approche à travers des cas de modélisation et de simulation dans le domaine de la conception mécatronique automobile.



# Chapitre 3

## Validation de l'approche retenue

### 1 Introduction

Dans ce chapitre nous proposons de valider l'approche que nous avons proposée pour l'intégration de la modélisation et la simulation multi-physique dans le processus de conception des systèmes mécatroniques. Cette approche sera ainsi appliquée pour la modélisation, la vérification et l'optimisation d'un véhicule électrique.

Le but de cette partie n'est pas de développer toute la conception du véhicule électrique, mais de se limiter à la modélisation et la vérification de l'architecture physique du système à trois échelles différentes de modélisation : au niveau de tout le système, au niveau du convertisseur de puissance et au niveau des fils de bonding. Par ailleurs, trois niveaux d'abstraction seront aussi considérés : le niveau de pré-conception, le niveau de conception préliminaire et le niveau de conception détaillée. Trois exigences doivent alors être vérifiées :

- E3 : le véhicule doit atteindre 100 km/h en 10 secondes.
- E2 : les composants du module de puissance doivent fonctionner à des températures inférieures à 170 ° C.
- E1 : les contraintes mécaniques appliquées aux fils de bonding doivent être inférieures à 200 MPa.

Pour la vérification et la validation de ces exigences par simulation, il est nécessaire d'établir des modèles physiques pour le système véhicule électrique, le convertisseur de puissance et le fil de bonding.

Un schéma conceptuel du véhicule électrique est donné par la figure 3.1.

La détermination des températures dans le convertisseur de puissance nécessite le calcul des pertes en puissance qui dépendent, entre autres, du courant électrique alimentant le moteur.

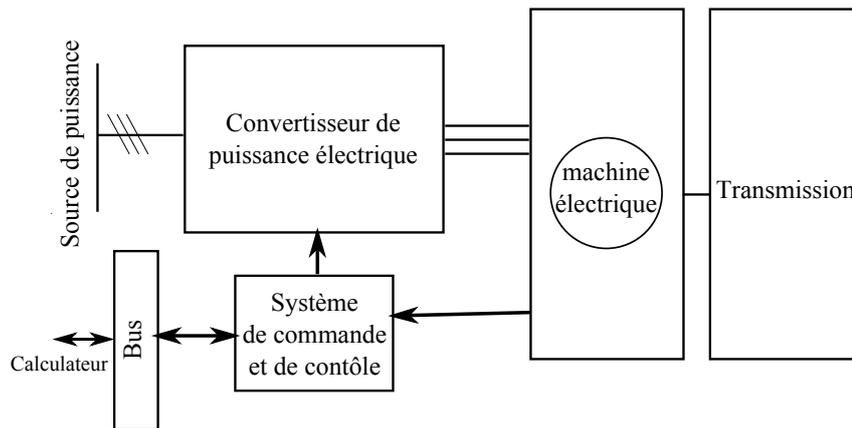


FIGURE 3.1 – Schéma conceptuel d'un véhicule électrique

Pour le fil de bonding, les contraintes mécaniques sont dues essentiellement aux températures dans le module de puissance (dilatation thermique). Il est ainsi important d'établir, au niveau conceptuel, les liens entre les variables physiques intervenant aux différents niveaux de modélisation. La figure 3.2 montre les principales variables physiques à modéliser ainsi que les liens entre elles.

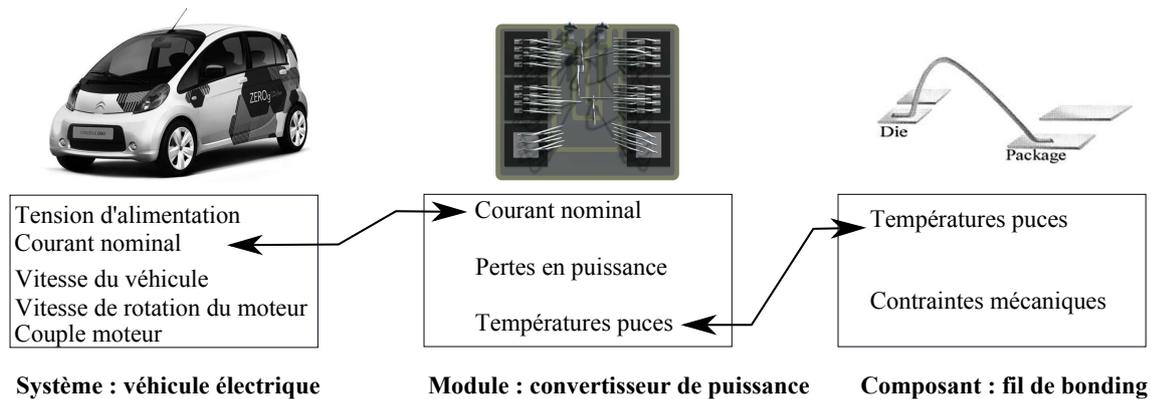


FIGURE 3.2 – Les principales variables physiques à modéliser et les liens entre elles

La figure 3.3 schématise les étapes du processus de validation de l'approche qu'on a adoptée pour l'intégration de la simulation multi-physique dans le cas d'un véhicule électrique.

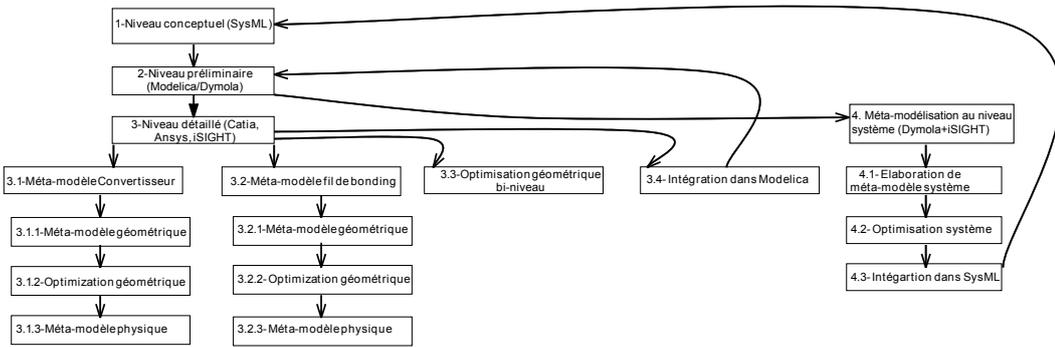


FIGURE 3.3 – Processus adopté pour la validation de l'approche

## 2 Modélisation conceptuelle d'un véhicule électrique

La modélisation de l'architecture physique au niveau conceptuel (niveau P3) du système véhicule électrique a été effectuée avec le langage de modélisation SysML, en utilisant le logiciel Artisan Studio (figure 3.4). Cette figure représente un BDD

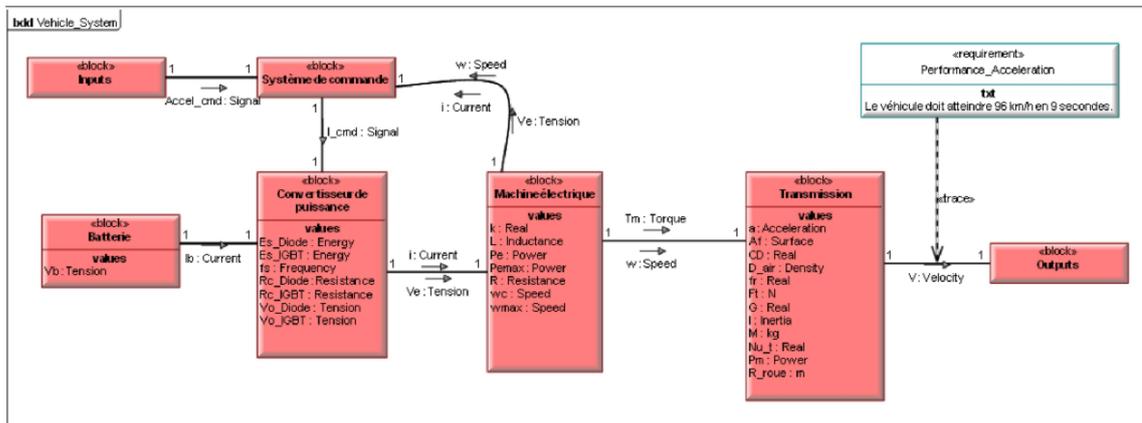


FIGURE 3.4 – Architecture physique au niveau préconception (méta-modélisation avec SysML)

sur lequel les principales parties constituant le véhicule sont représentées par des blocs SysML. Sur ce BDD sont également représentées les variables d'entrée, de sortie et de couplage. Une description détaillée de ces variables sera donnée dans la section suivante. Il faut signaler ici que l'un des avantages de l'utilisation de l'outil d'ingénierie système SysML est la possibilité de définir une traçabilité entre les exigences du cahier des charges et les résultats attendus des simulations. Ainsi

sur le BDD, un lien de traçabilité a été défini entre l'exigence E3 qui correspond à la performance d'accélération du véhicule et la variable de sortie 'vitesse du véhicule'.

### 3 Modélisation physique préliminaire du système véhicule électrique

La modélisation physique au niveau P2 du véhicule électrique a été effectuée avec le logiciel de modélisation et de simulation multi-domaine Dymola qui est basé sur le langage de modélisation Modelica (figure 3.5).

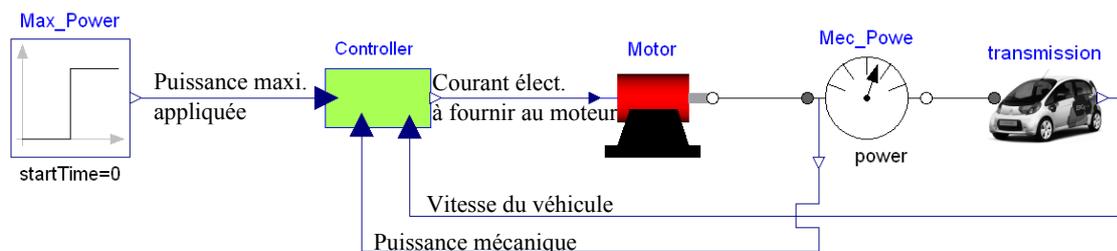


FIGURE 3.5 – Modélisation du véhicule électrique avec Dymola (Modelica)

Les éléments considérés dans cette modélisation du véhicule électrique sont : une partie commande (controller), un moteur électrique et une transmission. Le convertisseur de puissance sera pris en considération dans les étapes suivantes de modélisation, donc il n'est pas représenté sur la figure 3.5.

La partie commande est constituée de deux régulateurs de type PID avec des limitations (min, max) en sortie (figure 3.6). Le PID1 compare la puissance électrique maximale fournie en entrée  $P_{e_{in}}(W)$  avec la puissance mécanique mesurée à la sortie de l'arbre moteur  $P_m(W)$ . La sortie de PID1 correspond à une consigne de vitesse  $V_i(km/h)$ , qui sera l'entrée du deuxième régulateur PID2. Ce dernier compare la vitesse  $V_i(km/h)$  avec celle effectuée par le véhicule  $V_m(km/h)$ . En sortie, le PID2 fournit le courant électrique  $i(A)$  nécessaire pour alimenter le moteur électrique.

Pour le moteur électrique, sa vitesse de rotation  $\omega_m$  est supposée proportionnelle à la force électromotrice du moteur  $V_{emf}(V)$  suivant l'équation 3.1 :

$$k \cdot \omega_m = V_{emf} \quad (3.1)$$

Où  $k(N.m/A)$  est une constante qui dépend des caractéristiques de la conception du moteur (nombre de conducteurs, nombre de paires de pôles, surface de chaque

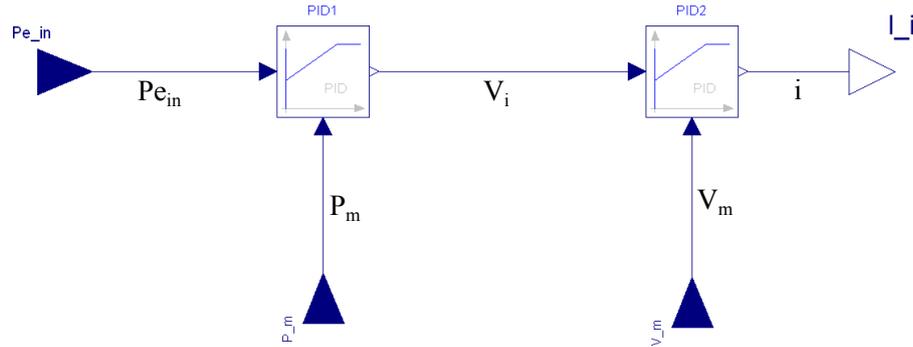


FIGURE 3.6 – Le système de contrôle du véhicule

spire, ...).

Le couple moteur  $T_m(N.m)$  est supposé proportionnel au courant électrique  $i(A)$  alimentant le moteur. L'équation liant le courant au couple est donnée par l'équation 3.2 :

$$T_m = k.i \quad (3.2)$$

Le modèle électrique qui définit le moteur est donné par l'équation 3.3 :

$$V_e = L.\frac{di}{dt} + R.i + V_{emf} \quad (3.3)$$

$R(\Omega)$  et  $L(H)$  sont respectivement la résistance interne et l'inductance interne du moteur et  $V_e(V)$  est la tension qui alimente le moteur.

Le modèle mathématique pour la transmission est donné par l'effort de traction  $F_t(N)$  développé par le moteur électrique, qui doit être égal à la somme de l'effort d'entraînement du véhicule (effort d'inertie de véhicule) et des efforts résistants dus à la résistance au roulement, la résistance de l'air et l'effet de pente de la route. Ce modèle est traduit par l'équation 3.4 ([LARMINIE & LOWRY 03]) :

$$F_t = (M + I.\frac{G^2}{\eta_g.r^2}).a + (M.g.f_r + \frac{1}{2}.d_{air}.C_D.A_f.v^2 + M.g.sin(\alpha)) \quad (3.4)$$

Où  $M(kg)$  est la masse du véhicule,  $g(m/s)$  est l'accélération de la pesanteur,  $f_r$  est le coefficient de résistance au roulement,  $d_{air}(kg/m^3)$  est la densité de l'air,  $C_D$  est le coefficient aérodynamique,  $A_f(m^2)$  est la surface frontale du véhicule,  $v(m/s)$  est la vitesse du véhicule,  $a(m/s^2)$  est l'accélération du véhicule,  $I(kg.m^2)$  est le moment d'inertie des parties tournantes dans le véhicule,  $G$  est le rapport de réduction globale entre le moteur et la transmission,  $\eta_g$  est le rendement global de la

transmission,  $r(m)$  est le rayon des roues et  $\alpha$  est l'angle de la pente de la route. On considère que la route est horizontale, donc l'angle  $\alpha$  est supposé nul.

Les pertes de puissance électrique dans le convertisseur, au niveau de chaque puce (IGBT ou diode), sont dues à deux types de pertes : pertes par conduction  $P_{cond}$  et pertes de commutation  $P_s$ . Ainsi pour chaque puce les pertes  $P_p(W)$  sont calculées par le modèle simple 3.5 :

$$P_p = P_{cond} + P_s = D_f \cdot ((V_o + R_c \cdot i_c) \cdot i_c + E_s \cdot f_s) \quad (3.5)$$

$V_o(V)$ ,  $R_c(\Omega)$  et  $E_s(J)$  sont des caractéristiques des puces qu'on peut déterminer à partir des abaques des constructeurs,  $D_f$  est le facteur d'utilisation de la puce (Duty Factor) et  $f_s(Hz)$  est la fréquence de commutation.  $i_c(A)$  est le courant moyen traversant chaque puce. Pour plus de détails sur cette équation, le lecteur peut consulter [VALLON 03].

Pour pouvoir vérifier l'exigence E3, des modèles Modelica ont été établis. Modelica utilise une approche de modélisation 'Bottom-Up' pour construire le modèle du véhicule. Ainsi, en partant des composants de base qui se trouvent dans la bibliothèque Modelica et en ajoutant les équations d'autres composants, le système est construit d'une manière croissante. A titre d'exemple, la figure 3.7 montre le modèle graphique ainsi que le code Modelica correspondant à la transmission.

Dans cette figure, deux composants de la bibliothèque Modelica ont été utilisés. Le composant '*idealGear*' qui représente un réducteur sans pertes, de rapport de réduction  $G_r$  et le composant '*R2T*' qui convertit le mouvement de rotation en un mouvement de translation et qui modélise ici une roue de rayon ' $r$ '. Un composant force a été utilisé pour modéliser un effort résistant total  $F_t$ , appliqué sur le véhicule, dont l'expression est donnée dans le code Modelica à droite de la figure.

Ce code est constitué de deux parties : une partie déclaration et une partie équations. La partie déclaration est constituée de deux types de variables, les *paramètres* qui ne dépendent pas du temps et qui sont précédés du terme '*parameter*', les autres sont les *variables* qui varient en fonction du temps. Pour que le système d'équations soit résoluble avec Modelica, il faut que le nombre de variables soit égal au nombre d'équations. Dans le cas du modèle de la transmission nous avons 7 équations et 6 variables déclarées dans le code et une variable déclarée dans le graphique de Modelica et qui correspond à la vitesse du véhicule  $V$ . La fonction '*der()*' dans les équations indique une dérivation par rapport au temps.

Pour le test de performance d'accélération on a choisi  $Pe_{in} = 100kw$ . Les valeurs des paramètres intervenant dans le modèle de la transmission correspondent aux

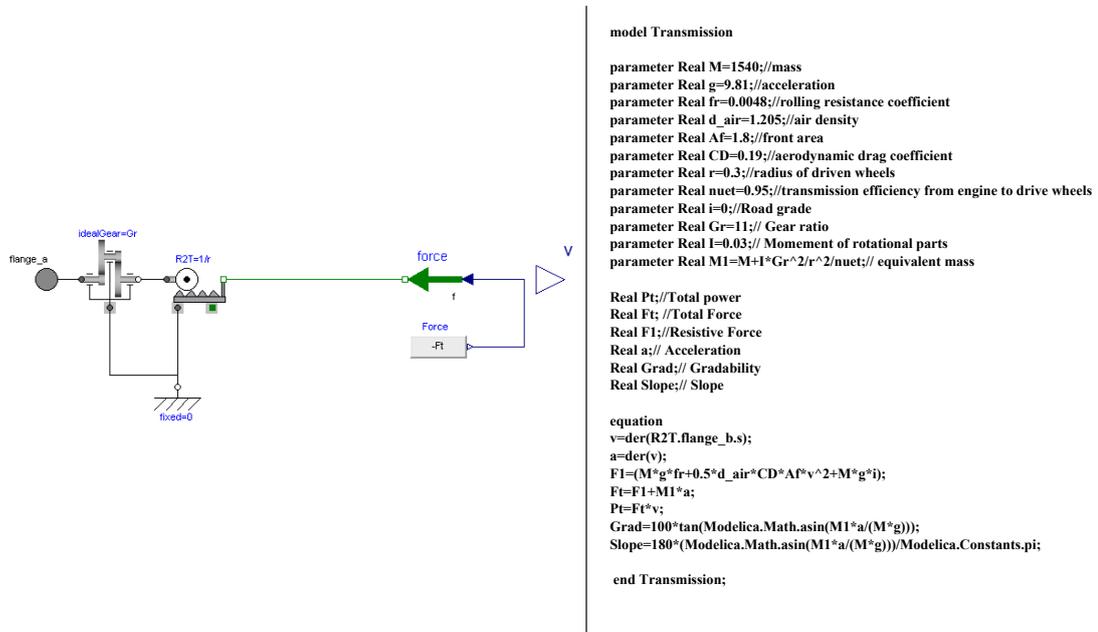


FIGURE 3.7 – Modélisation de la transmission sous Dymola (Modelica)

valeurs du véhicule électrique de General Motors 'GM-EV1' qui sont publiés dans [LARMINIE & LOWRY 03]. Les valeurs des différents paramètres sont données dans le tableau 3.1

Après modélisation de tout le système avec Dymola, une analyse a été effectuée pour les différentes grandeurs sur un intervalle de temps de 20 secondes.

La figure 3.8 schématise la courbe de variation de la vitesse du véhicule durant ce test. Les résultats montrent que le véhicule atteint la vitesse de 100 km/h en 10 secondes.

Huit autres résultats de simulation des variables physiques du véhicule électrique sont donnés dans la figure 3.9.

La courbe a, qui schématise la variation du courant électrique dans le moteur, montre que le régulateur applique un courant maximal  $I_{max} = 305A$  pendant 7.3 secondes. Durant ce temps le moteur fournit un couple maximal  $T_{max} = 130N.m$  (courbe e). A l'instant  $t=7.3$  secondes, la vitesse de rotation du moteur atteint une vitesse  $\omega_c = 770rad/s$  et la puissance électrique au niveau du moteur atteint son maximum  $104kW$  (courbe c). La courbe indique également la puissance mécanique enregistrée qui est  $103kW$ . La courbe c montre aussi que la puissance électrique au

Paramètres	Valeurs
Masse du véhicule $M$	1540 $kg$
Accélération $g$	9.81 $m/s^2$
Coef. de résistance au roulement $f_r$	0.0048
Densité de l'air $d_{air}$	1.205 $kg/m^3$
Coef. aérodynamique $C_D$	0.19
Surface frontale du véhicule $A_f$	1.8 $m^2$
Moment d'inertie des parties tournantes $I$	0.03 $kg.m^2$
Rapport de réduction globale $G$	11
Rayon des roues $r$	0.3 $m$
Rendement global de la transmission $\eta_g$	0.95
Caractéristique du moteur $k$	0.42 $N.m/A$
Inductance interne du moteur $L$	0.01 $H$
Résistance interne du moteur $R$	0.02 $\Omega$
Facteur d'utilisation des puces $D_f$	0.4
Tension $V_o$ d'IGBT	0.95 $mV$
Tension $V_o$ de diode	0.9 $mV$
Résistance $R_c$ d'IGBT	4.7 $m\Omega$
Résistance $R_c$ de diode	3.3 $m\Omega$
Énergie de commutation $E_s$ d'IGBT	7.5 $mJ$
Énergie de commutation $E_s$ de diode	3.5 $mJ$
Fréquence de commutation $f_s$	8 $kHz$
Gains pour les deux PID $K_G$	5
Constantes de temps d'intégration de deux PID $t_i$	0.5 $s$
Constantes de temps de dérivation de deux PID $t_d$	0.5 $s$

TABLE 3.1 – Paramètres de simulation

niveau du moteur et la puissance mécanique enregistrée à sa sortie sont très proches, ce qui est conforme avec courbe d qui donne la variation du rendement du moteur.

Entre l'instant 7.3 secondes et 11.5 secondes, la puissance développée par le moteur reste presque constante, mais le couple diminue, ce qui permet à la vitesse de rotation du moteur d'augmenter. A partir de 11.5 secondes, la puissance du moteur, le courant qui l'alimente et le couple moteur diminuent fortement. Le moteur atteint une vitesse de rotation maximale  $\omega_{max} = 1222 rad/s$  à 13.8 secondes (courbe f), qui correspond à une vitesse 120  $km/h$  pour le véhicule (figure 3.8).

La courbe b indique que la tension nécessaire à l'alimentation du moteur atteint un maximum de 512 V. Ce résultat avec celui du courant (courbe a) aide au dimensionnement de la batterie qui alimente le véhicule.

la courbe g, qui montre la variation de l'effort de traction, indique que le moteur

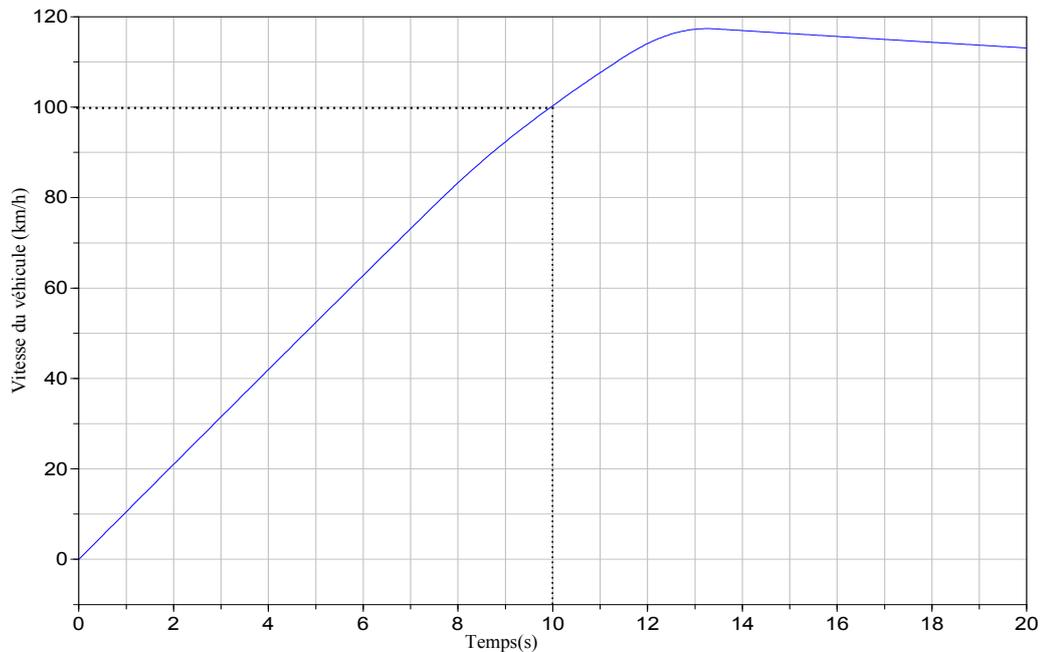


FIGURE 3.8 – *Vitesse du véhicule électrique*

électrique doit développer un effort maximal de traction de 4693 N pour ce test d'accélération.

La courbe h, qui donne la variation de l'accélération du véhicule, montre qu'un maximum de  $2.92 \text{ m/s}^2$  est atteint durant le test de performance.

En comparant ces résultats à ceux publiés dans [LARMINIE & LOWRY 03] concernant le véhicule GM-EV1, on trouve pour les deux cas que le véhicule atteint la vitesse de 100km/h en 10 secondes. La puissance électrique utilisée pour GM-EV1 est 102 kW, alors que dans notre étude on a trouvé une puissance 104 kW. Le moteur électrique utilisé pour GM-EV1 a une vitesse maximale de 12000 tr/min (1256 rad/s) et dans notre étude on a trouvé une vitesse maximale 1222 rad/s. Cela nous permet de conclure que le modèle qu'on a développé a un niveau suffisant de validité pour la simulation et le pré-dimensionnement des composants d'un véhicule électrique.

Pour vérifier le comportement thermique du convertisseur de puissance et la résistance mécanique du fil de bonding en utilisant Modelica, il est possible de développer des modèles analytiques. Mais, vu le fort couplage entre la géométrie et

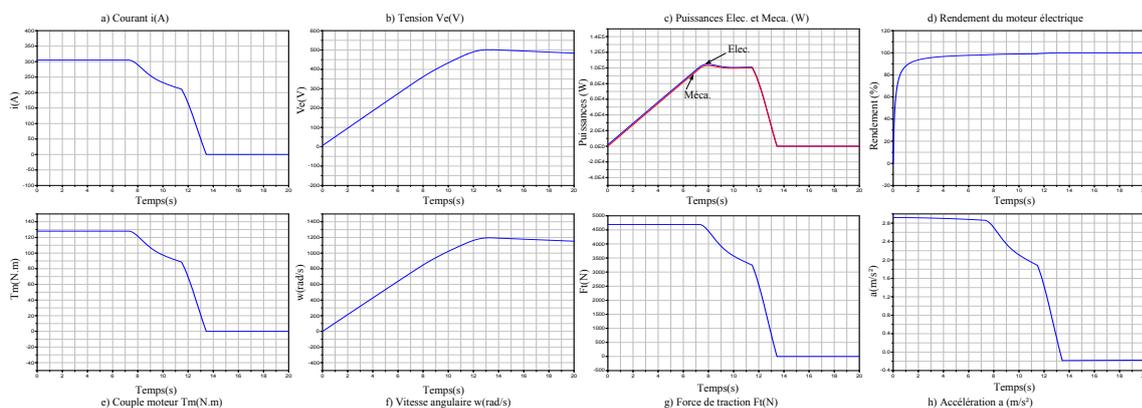


FIGURE 3.9 – Résultats de simulation

le comportement de ces composants, les méthodes analytiques ne permettent pas d'avoir des modèles précis, à moins qu'ils soient recalés par rapport à des modèles expérimentaux ou des simulations par éléments finis.

Pour cette raison, nous avons adopté la technique de méta-modélisation par approximation pour élaborer des modèles compacts pour le convertisseur de puissance et le fil de bonding, permettant à la fois l'optimisation géométrique et la modélisation de leur comportement multi-physique.

## 4 Modélisation physique au niveau détaillé

Dans le niveau détaillé de conception, nous proposons d'étudier deux composants du véhicule électrique que sont le convertisseur de puissance et le fil de bonding.

La notion du composant et du système dépend du contexte et de l'échelle d'étude. Ainsi, le convertisseur de puissance pourrait être considéré comme un système vis-à-vis du fil de bonding et comme composant par rapport au véhicule.

Le but de cette partie est d'élaborer des modèles physiques pour ces deux organes par la technique de méta-modélisation par approximation. La même démarche sera ainsi appliquée à ces deux éléments.

Dans un premier temps, nous élaborons des méta-modèles géométriques pour le convertisseur de puissance et pour le fil de bonding. Puis des optimisations géométriques seront effectuées sur ces méta-modèles pour chercher les configurations géométriques optimales par rapport à des contraintes multi-physiques. Une optimisation géométrique bi-niveaux couplant les deux méta-modèles sera également effec-

tuée. Ensuite, à partir des configurations géométriques optimales, nous élaborons les méta-modèles physiques pour les deux objets étudiés. Les méta-modèles physiques seront enfin intégrés dans l'architecture globale pour une vérification des exigences E2 et E1 au niveau système.

#### 4.1 Élaboration d'un méta-modèle optimal pour le convertisseur de puissance

La figure 3.10-a) montre un modèle géométrique 3D du convertisseur de puissance. Les flèches sur la figure indiquent les flux de chaleur dont les valeurs sont le résultat du calcul électro-thermique des pertes en puissance électrique ( Equation 3.5).

Pour des raisons de simplification, les flux de chaleur sont supposés assigner aux faces supérieures des semi-conducteurs. La répartition de ces derniers dans le convertisseur de puissance est donnée par la figure 3.10-b).

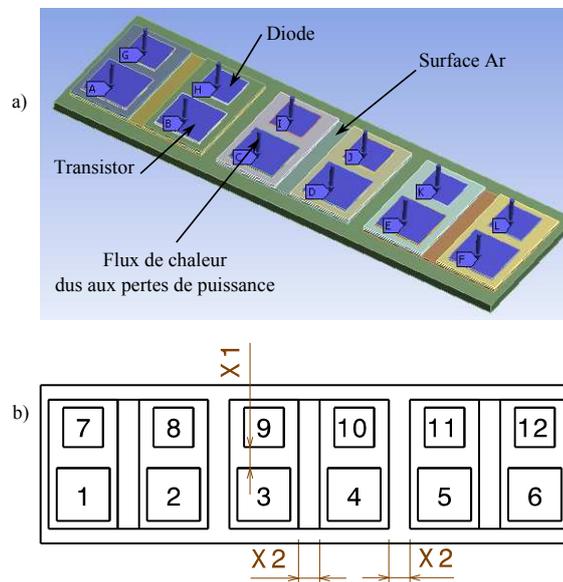


FIGURE 3.10 – *Shémas du convertisseur de puissance : a) schéma 3D et b) schéma 2D, répartition des transistors et diodes.*

La géométrie a été paramétrée avec le logiciel de CAO CATIA V5<sup>1</sup> en ajoutant des contraintes d'assemblage entre les composants et des relations entre leurs dimensions

1. <http://www.3ds.com/fr/products/catia/>

telles que quand on modifie quelques paramètres ( $X1$  et  $X2$  dans la figure 3.10-b), le modèle géométrique du convertisseur de puissance reste topologiquement cohérent. Ce qui veut dire que le nombre de faces géométriques dans le convertisseur de puissance reste le même durant les itérations d'évaluation par éléments finis. Ceci permet au logiciel de calcul par EF Ansys WorkBench de retrouver les faces auxquelles sont affectés les flux de chaleur. Le format STEP a été choisi pour l'échange automatique du modèle géométrique entre les logiciels CATIA et Ansys WorkBench durant les itérations d'évaluation.

Dans cette étude, les différentes épaisseurs  $e(mm)$  des composants sont choisies constantes. Le comportement thermique du convertisseur de puissance sera analysé en régime permanent sur une échelle de temps de 20 secondes. Dans ce cas seule la conductivité thermique  $\lambda(W/m.K)$  des matériaux constituant le convertisseur de puissance est nécessaire.

La figure 3.11 montre les différentes couches qui constituent le convertisseur de puissance.

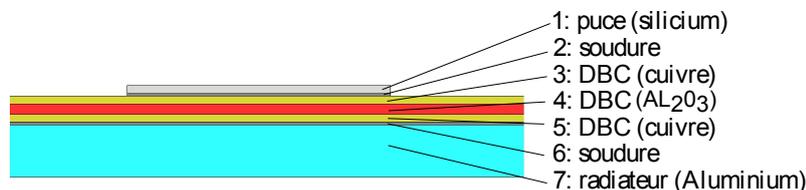


FIGURE 3.11 – Section des différentes couches du module de puissance

Les épaisseurs des composants<sup>2</sup> et les conductivités thermiques sont données par le tableau 3.2.

Matière	Ref.	$e(mm)$	$\lambda(W/m.K)$
Puce (Si)	1	0.3	fig.3.12
Soudure	2, 6	0.1	60
Cuivre	3, 5	0.3	390
DBC( $Al_2O_3$ )	4	0.4	23
Radiateur (Al)	7	2	237

TABLE 3.2 – Caractéristiques du module de puissance

Vue que la conductivité thermique du silicium est fortement dépendante de la température, ce comportement non-linéaire sera ainsi pris en compte dans cette étude. La figure 3.12 montre la variation de la conductivité thermique de silicium en fonction de la température. Par contre, pour les autres composants les conductivités

2. Direct Bonded Copper (DBC)

thermiques seront considérées constantes.

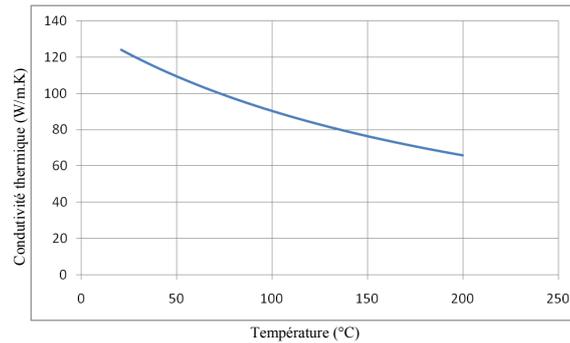


FIGURE 3.12 – *Conductivité thermique du silicium en fonction de la température*

Le calcul des températures des puces a été effectué avec le logiciel de calcul par éléments finis Ansys Workbench. Les faces supérieures des puces sont soumises à des débits de chaleur qui sont dus aux pertes de puissance électrique. La face inférieure du radiateur est soumise à un échange de chaleur par convection. La figure 3.13 montre une répartition de la température dans le convertisseur. Cette figure met en évidence l'influence mutuelle entre les puces pour la répartition de la température.

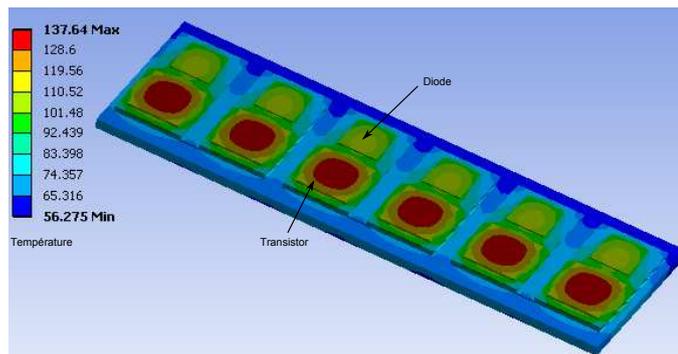


FIGURE 3.13 – *Analyse thermique par éléments finis*

#### 4.1.1 Construction d'un méta-modèle géométrique pour le convertisseur de puissance

Le vecteur d'entrées  $\mathbf{X}$  est défini par les paramètres géométriques  $X_1$  et  $X_2$  ( $\mathbf{X} = [X_1, X_2]$ ) tels qu'ils sont définis dans la figure 3.10. Le vecteur des fonctions de

sortie  $F(\mathbf{X})$  est défini par trois variables, la surface  $A_r$  de cuivre (plaque repère 3 dans la figure 3.11), la températures  $T_3$  de l'IGBT numéro 3 et la température  $T_9$  de la diode 9 (figure 3.10). Ainsi  $F(\mathbf{X})=[A_r, T_3, T_9]$ . Le choix de la surface  $A_r$  parmi les fonctions de sortie est justifié par la nécessité d'optimiser cette surface. En effet, une surface large favorise l'évacuation de la chaleur mais en contre partie augmente les effets parasites dus aux inductances et capacités propres et mutuelles des plaques de cuivre. Une large surface implique également un convertisseur de puissance plus volumineux.

Les valeurs moyennes des débits de chaleur sont considérées,  $P_g = 200W$  pour les IGBT et  $P_d = 100W$  pour les diodes. Le coefficient d'échange par convection sur la face inférieure de la plaque du radiateur est  $h = 1.4W/mm^2$

Le domaine de variation pour chacune des variables  $X_1$  et  $X_2$  est choisi de 1 à 10 mm. L'algorithme LH optimal du logiciel iSIGHT a été choisi pour l'évaluation des points du plan d'expériences (DOE).

Le tableau 3.3 donne les résultats des calculs de ce plan d'expériences et l'évaluation des fonctions de sortie.

Iter.	$X_1(mm)$	$X_2(mm)$	$A_r(mm^2)$	$T_3(^{\circ}C)$	$T_9(^{\circ}C)$
1	2.96	4.52	716	134	112
2	6.48	4.91	834	133	105
3	1.39	3.35	642	139	119
4	4.13	5.70	781	132	107
5	3.74	9.61	863	126	104
6	3.35	2.57	681	139	115
7	7.65	1.39	771	144	111
8	10.00	5.70	967	136	104
9	4.52	7.65	842	129	104
10	5.70	9.22	923	126	101
11	1.00	5.30	673	135	118
12	8.04	6.48	927	131	102
13	5.30	1.78	717	141	113
14	8.43	10.00	1042	128	99
15	2.57	7.26	767	130	109
16	7.26	8.43	956	128	100
17	2.17	1.00	612	145	123
18	8.83	4.13	884	137	106
19	6.87	2.96	793	138	108
20	9.22	8.04	1012	131	101
21	5.70	6.87	861	130	103
22	9.61	2.17	848	144	110
23	4.91	3.74	756	136	109
24	1.78	8.83	776	128	110

TABLE 3.3 – Résultats du DOE et évaluation des fonctions de sortie pour le convertisseur de puissance

Les surfaces de réponse ont été générées en utilisant les deux algorithmes RBF

et RPQ d'iSIGHT. Une analyse des erreurs et une comparaison entre les deux algorithmes sont données dans le tableau 3.4.

Variable	Méthode d'approx.	Erreur (%)		
		Moyenne	RMS	Maximale
$A_r(mm^2)$	RPQ	$7.10^{-7}$	$8.10^{-7}$	$2.10^{-6}$
	RBF	0.3	0.4	0.9
$T_3(^{\circ}C)$	RPQ	1.47	1.87	4.48
	RBF	1.13	1.39	3.01
$T_9(^{\circ}C)$	RPQ	1.13	1.52	3.48
	RBF	1.25	1.79	6.03

TABLE 3.4 – Analyse des erreurs, comparaison entre RBF et RPQ

Pour la surface de réponse de  $A_r$ , le modèle RPQ présente des erreurs très faibles par rapport au modèle RBF, même si, pour le modèle RBF, les erreurs moyenne, RMS et maximale restent inférieures à 1%. Pour la température  $T_3$ , le modèle RBF présente des résultats légèrement meilleurs que le modèle RPQ. Par contre, pour  $T_9$ , c'est le modèle RPQ qui présente une approximation légèrement meilleure que le modèle RBF.

Ces résultats montrent qu'il n'existe pas de règles préalables qui permettent de dire qu'elle est la meilleure méthode d'approximation. C'est à l'utilisateur de tester diverses méthodes et d'analyser les erreurs pour déduire la meilleure approximation. La figure 3.14 montre une analyse des erreurs pour le modèle approximé par RBF. La partie supérieure de la figure 3.14 montre le taux d'ajustement des modèles ap-

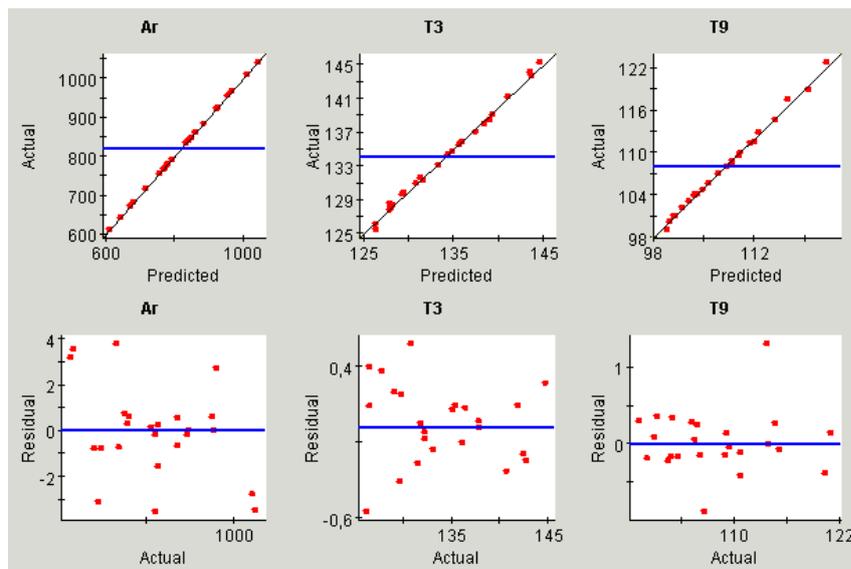


FIGURE 3.14 – Validation du modèle RBF

proximés qui sont représentés par des points sur les figures par rapport aux modèles de référence qui sont représentés par des lignes inclinées. Les modèles de références correspondent à la surface calculée par CATIA pour  $A_r$  et les températures évaluées par Ansys Workbench pour  $T_3$  et  $T_9$ .

La partie inférieure de la figure 3.14 montre la distribution des erreurs dans les points de calcul entre les modèles de référence et les modèles approximés. Plus les points sont proches de la ligne horizontale plus le modèle approximé est proche du modèle de référence.

A titre d'exemple, le modèle approximé de la surface  $A_r$  présente une erreur maximale de  $+4mm^2$  pour une surface à peu près égale à  $800mm^2$ .  $T_3$  présente un résiduel maximal qui ne dépasse pas  $0.5^\circ C$ . Pour  $T_9$ , on enregistre deux résiduels extrêmes de  $1.2^\circ C$  et  $-1^\circ C$ , les autres résiduels sont dans l'intervalle  $[-0.5^\circ C, +0.5^\circ C]$ .

La figure 3.15 montre une représentation graphique 3D de trois surfaces de réponse du modèle approximé par la méthode RBF. Ces résultats montrent que la

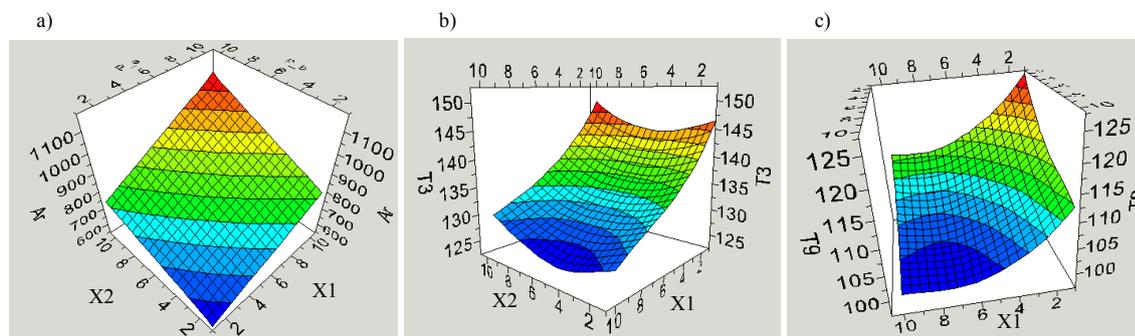


FIGURE 3.15 – Surfaces de réponse du modèle RBF : a) Surface  $A_r$ , b) température  $T_3$  et c) température  $T_9$

surface de réponse pour  $A_r$  a un comportement linéaire par rapport aux variables géométriques  $X_1$  et  $X_2$ , qui est un résultat prévu. Par contre  $T_3$  et  $T_9$  présentent des non-linéarités faibles.

Les surfaces de réponse montrent également les effets antagonistes entre les températures ( $T_3$  et  $T_9$ ) et la surface  $A_r$ . Quand  $X_1$  et  $X_2$  augmentent, les deux températures  $T_3$  et  $T_9$  diminuent, par contre la surface  $A_r$  augmente. Pour trouver le meilleur compromis, une optimisation géométrique est alors nécessaire.

#### 4.1.2 Optimisation géométrique sous contraintes multi-physiques du convertisseur de puissance

Après avoir généré les surfaces de réponse pour les deux températures  $T_3$ ,  $T_9$  et la surface  $A_r$  en utilisant la méthode RBF, nous proposons dans cette section d'effectuer deux processus d'optimisation. Le premier est basé sur les surfaces de réponse RBF et le deuxième sera effectué sur les modèles d'origine (CAO et EF), dans le but de comparer ces deux méthodes.

Le tableau 3.5 présente les conditions et les résultats de ces optimisations.

Variables	Limit. Inf.	Val. Départ	Limit. Sup.
$X_1(mm)$	1	4	8
$X_2(mm)$	1	4	8
Contraintes	Limit. Inf.		Limit. Sup.
$A_r(mm^2)$	...		800
$T_3(^{\circ}C)$	...		140
$T_9(^{\circ}C)$	...		115
Objectifs	Direction	Echelle	Pondération
$A_r(mm^2)$	minimiser	800	1
$T_3(^{\circ}C)$	minimiser	140	1
$T_9(^{\circ}C)$	minimiser	115	1
Rés. d'optim. avec SR	Limit. Inf.	Optimum	Limit. Sup.
$X_1(mm)$	2.5	2.75	3.25
$X_2(mm)$	2.5	3	3.25
Rés. d'optim. Directe	Limit. Inf.	Optimum	Limit. Sup.
$X_1(mm)$	2.5	3	3.5
$X_2(mm)$	2.5	3.25	3.5

TABLE 3.5 – Résultats d'optimisation géométrique avec SR et directe

Les variables géométriques à optimiser sont  $X_1$  et  $X_2$  qui varient toutes les deux entre 1 et 8 mm avec un pas de variation de 0.25 mm. Les contraintes sont :  $A_r \leq 800$ ;  $T_3 \leq 140$  et  $T_9 \leq 115$ . Le problème d'optimisation est multi-objectif puisqu'on cherche à minimiser à la fois  $T_3$ ,  $T_9$  et  $A_r$ . Pour cela, un algorithme utilisant la méthode de programmation quadratique successive (Sequential Quadratic Programming (SQP)) a été utilisé. Cet algorithme correspond au Non-Linear Programming by Quadratic Lagrangian (NLPQL)[SCHITTKOWSKI 85].

NLPQL est un code pour résoudre des problèmes de programmation non-linéaire où les fonctions objectifs et les contraintes doivent être continûment différentiables. Cette méthode est basée sur la génération d'une séquence de programmation quadratique des sous-problèmes obtenus par une approximation quadratique de la fonction de Lagrange et une linéarisation des contraintes. Cet algorithme a été choisi parce qu'il est bien adapté pour les problèmes non-linéaires dont le domaine de conception est continu.

Pour mettre à même échelle les différents objectifs, le paramètre *Échelle* de cet algorithme a été utilisée. Ainsi, l'algorithme transforme le problème multi-objectif en un problème mono-objectif. Les coefficients de pondération de l'algorithme permettent d'accorder des influences différentes aux objectifs en leur attribuant des valeurs différentes.

Dans notre cas, les valeurs d'échelle ont été choisies de façon à ce que les fonctions objectifs soient de même ordre de grandeur et on leur a attribué le même facteur de pondération égale à un. La résolution du problème d'optimisation a été effectuée avec le logiciel iSIGHT.

Le problème d'optimisation a été résolu de trois façons différentes. Une première fois, en utilisant le méta-modèle et en partant d'un point initial choisi ( $X_1=4$  mm et  $X_2=4$ mm), une deuxième fois, en utilisant les modèles de base (CAO+EF) en partant du même point initial que la première optimisation et une troisième fois, en utilisant les modèles de base, mais en partant du point optimal donné par la première optimisation.

Les résultats donnent un intervalle optimal entre 2.5 et 3.25 mm pour les deux variables  $X_1$  et  $X_2$  avec la première optimisation et un intervalle entre 2.5 et 3.5 mm pour la deuxième et la troisième optimisation. Les meilleurs points trouvés, suivant les coefficients de pondération qu'on a donnés, sont  $X_1=2.75$  mm et  $X_2=3$ mm pour la première optimisation et  $X_1=3$  mm et  $X_2=3.25$ mm pour la deuxième et la troisième optimisation. Le temps de calcul pour la première optimisation est de 2 secondes, il est de 29 min pour la deuxième optimisation et 4 minutes pour la troisième optimisation.

Ces résultats montrent l'intérêt de l'approche de méta-modélisation par approximation. Elle permet un gain important du temps dans les problèmes d'optimisation (59 fois plus rapide dans notre cas) sans trop perdre sur la précision des résultats. Pour les problèmes à la fois coûteux en temps de calcul et qui nécessitent une bonne précision, la combinaison de l'optimisation sur le méta-modèle avec l'optimisation directe sur les modèles de base permet de trouver la solution précise avec un gain de temps (7.5 fois plus rapidement que la méthode directe seule dans notre cas).

#### 4.1.3 Construction d'un méta-modèle pour les températures

Après avoir trouvé la configuration géométrique optimale pour le convertisseur de puissance, nous allons maintenant construire à partir de cette configuration un méta-modèle pour les températures  $T_3$  et  $T_9$ .

Le vecteur d'entrées est défini par deux variables  $P_3$  et  $P_9$  qui représentent les débits de chaleur pour les transistors et les diodes respectivement. On suppose que tous les transistors ont le même débit de chaleur  $P_3$  et que toutes les diodes ont également le

même débit de chaleur  $P_9$ . La variable  $P_3$  varie entre 50 et 400 W et  $P_9$  varie entre 10 et 150 W.

Comme pour le méta-modèle géométrique, l'algorithme LH optimal du logiciel iSIGHT a été choisi pour l'évaluation des points du DOE. Le logiciel Ansys Workbench a été utilisé pour l'évaluation des températures pour chaque couple de débit de chaleur ( $P_3, P_9$ ). Le tableau 3.6 donne les résultats du DOE et d'évaluation des températures.

Iter.	$P_3(W)$	$P_9(W)$	$T_3(^{\circ}C)$	$T_9(^{\circ}C)$
1	231	15	143	67
2	197	87	132	102
3	118	73	92	86
4	174	64	119	86
5	321	78	194	109
6	50	82	61	85
7	73	55	69	70
8	310	51	186	95
9	84	28	72	55
10	298	24	178	81
11	152	105	112	108
12	95	100	84	100
13	185	37	122	72
14	344	136	211	147
15	106	145	94	129
16	287	150	183	150
17	140	19	99	57
18	265	96	167	114
19	355	10	206	82
20	276	123	175	132
21	219	141	148	137
22	163	132	119	126
23	377	91	224	123
24	389	33	225	97
25	400	118	238	142
26	208	114	140	119
27	129	46	95	70
28	332	109	203	129
29	366	60	216	107
30	242	69	153	95
31	253	42	157	83
32	61	127	72	114

TABLE 3.6 – Résultats du DOE et évaluation des températures  $T_3$  et  $T_9$

Les surfaces de réponse des températures ont été générées en utilisant les approximations polynômiales RPQ et les réseaux de neurones RBF. Le tableau 3.7 présente une étude comparative des erreurs pour chaque méthode.

Les résultats montrent que l'erreur maximale pour la méthode RPQ est de 2.35% pour  $T_9$  alors qu'elle ne dépasse pas le 1% avec la méthode RBF pour les deux températures.

Variables	Méthode d'approx.	Erreur (%)		
		Moyenne	RMS	Maximale
$T_3$ (° C)	RPQ	0.18	0.25	0.9
	RBF	0.12	0.17	0.56
$T_9$ (° C)	RPQ	0.6	0.75	2.35
	RBF	0.3	0.37	0.89

TABLE 3.7 – *Analyse des erreurs sur les températures  $T_3$  et  $T_9$ , comparaison entre RBF et RPQ*

La figure 3.16 montre le niveau de calage du modèle approximé par rapport au modèle EF ainsi que la distribution des résiduels entre les deux modèles (approximés et EF).

Les coefficients des modèles polynomiaux des deux surfaces de réponse sont donnés par le tableau 3.8. Le tableau montre que les coefficients qui introduisent une non-linéarité sont faibles.

Termes des polynomes	$T_3$	$T_9$
Constantes	29.73	31.02
$P_3$	0.468	0.12
$P_9$	0.093	0.528
$P_3^2$	7.39E-05	3.91E-05
$P_9^2$	3.56E-05	6.60E-04
$P_3.P_9$	-4.16E-05	-2.87E-04

TABLE 3.8 – *Termes des polynômes  $T_3$  et  $T_9$*

Les surfaces de réponse des deux températures sont représentées par la figure 3.17. La figure montre des variations linéaires des deux températures par rapport aux variables d'entrée.

Dans cette partie, la technique de méta-modélisation par approximation a été utilisée pour élaborer des méta-modèles qui peuvent être utilisés comme support d'optimisation géométrique des convertisseurs de puissance. On a montré qu'ils peuvent également être utilisés pour aider dans le processus d'optimisation géométrique.

Des modèles algébriques simples, ont été ensuite obtenus par la technique de méta-modélisation par approximation. Ces modèles peuvent être facilement intégrés dans un simulateur système, pour la vérification du système global, ou bien au niveau conceptuel pour contribuer à l'évaluation de la performance du système.

L'inconvénient ici, c'est qu'on doit passer par la modélisation 'plus ou moins' détaillée du convertisseur de puissance pour extraire un modèle réduit. Mais, vu la complexité du problème à modéliser, due au couplage géométrique-multi-physique,

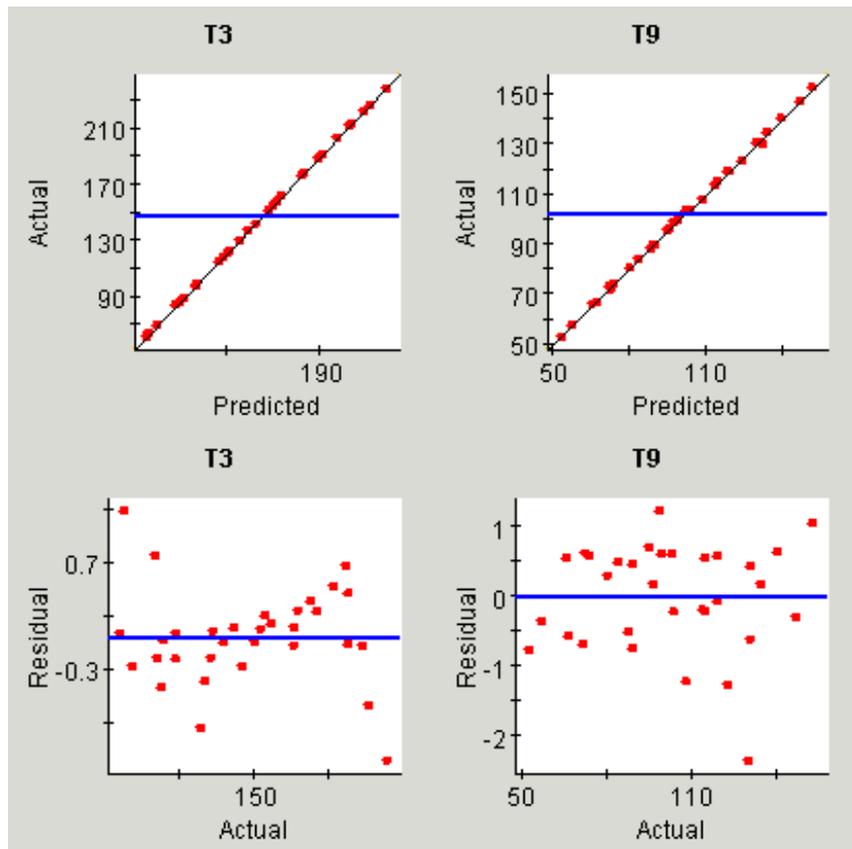


FIGURE 3.16 – Validation des surfaces de réponse de  $T_3$  et  $T_9$

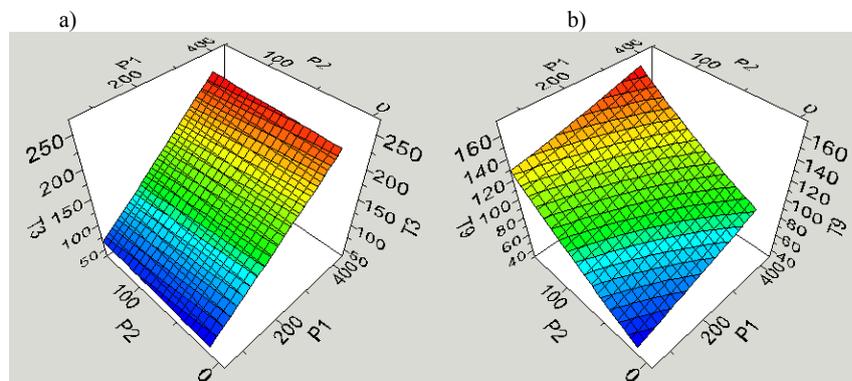


FIGURE 3.17 – Surfaces de réponse des températures : a)  $T_3$  et b)  $T_9$

l'élaboration d'un modèle réduit avec la technique de méta-modélisation par approximation est plus rapide que la recherche d'un modèle analytique, qu'il faut le valider soit avec un modèle de niveau détaillé soit par expérimentation.

## 4.2 Élaboration d'un méta-modèle optimal pour un fil de bonding

Comme pour le cas du convertisseur de puissance, nous construisons un méta-modèle géométrique sur lequel nous effectuerons une optimisation géométrique du fil de bonding. Puis nous construisons un méta-modèle physique pour les contraintes de Von-Mises.

### 4.2.1 Construction d'un méta-modèle géométrique pour le fil de bonding

La figure 3.18-a) montre la connexion entre un transistor et une diode avec des fils de bonding. Les paramètres géométriques qui contrôlent la forme et les dimensions du fil de bonding sont donnés dans la figure 3.18-b).

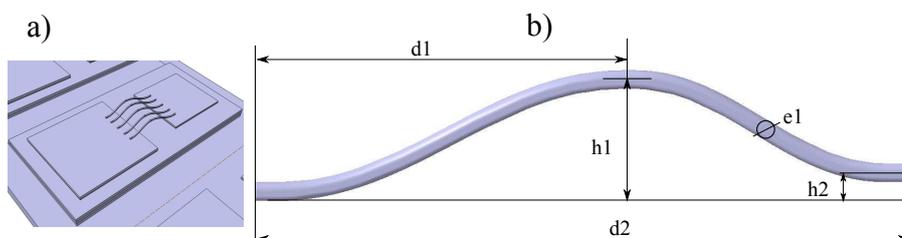


FIGURE 3.18 – a) Connexion des puces par les fils de bonding; b) Paramètres géométriques du fil de bonding

Pour réduire le nombre de variables de conception, on supposera que le paramètre  $d_2 = 7\text{mm}$  dans cette étude, ce qui correspond à la distance optimale entre les puces trouvée dans l'étude précédente (3 mm), avec 2mm de chaque côté du bonding pour la soudure. Les variations des autres paramètres donnent différentes configurations géométriques telles que celles présentées par la figure 3.19-a).

La différence des températures entre les deux extrémités d'un fil de bonding peut engendrer des contraintes mécaniques sur le fil, qui dépendent également des paramètres géométriques du fil de bonding. Cette géométrie a également un effet sur les fréquences propres du fil que l'on cherche à placer loin des fréquences de vibration

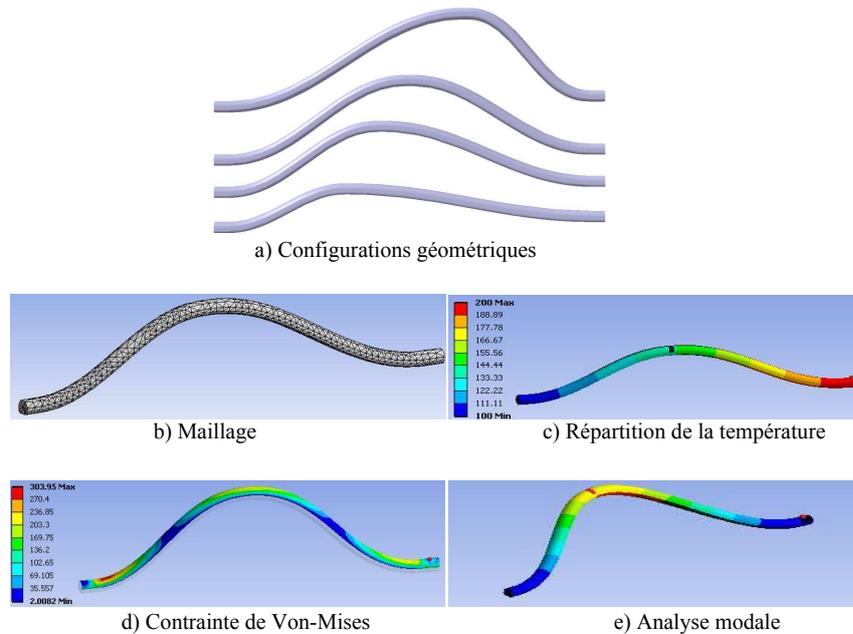


FIGURE 3.19 – *Etude des bondings*

des fils dues aux commutations des courants et aux présences des champs électromagnétiques au voisinage des fils de bonding. Ceci est surtout intéressant dans le cas où l'emploi du gel est réduit (Silica Gel Coating<sup>3</sup> par exemple).

Pour pouvoir étudier ce type de problèmes, la méthode des éléments finis est la méthode la mieux adaptée. Les figures 3.19 b), c), d) et e) montrent des cas d'analyse par EF pour étudier un fil de bonding. Pour cette étude, on a supposé que les températures aux extrémités du fil de bonding sont respectivement 200 ° C et 100 ° C. Le tableau 3.9 fournit les résultats du DOE et d'évaluation des variables de sortie qui correspondent à la masse du fil de bonding  $M(mg)$ , la contrainte de Von-Mises  $\sigma_e(\text{MPa})$  et la première fréquence propre de vibration du fil  $Fr(\text{Hz})$ . Le choix de ces trois variables revient au fait qu'on cherche à optimiser la configuration géométrique du fil de bonding tout en minimisant sa masse et la contrainte de Von-Mises et en maximisant la première fréquence propre.

Le tableau 3.10 présente les erreurs entre les modèles approximés élaborés par les méthodes RBF et RPQ.

La figure 3.20 montre le taux d'ajustement du modèle approximé par rapport au modèle direct (CAO+EF).

3. <http://www.semikron.com/skcompub/de/ISPSDpaper9142.PDF>

Iter.	d1(mm)	h1(mm)	e1(mm)	M(mg)	$\sigma_e$ (MPa)	Fr(Hz)
1	2.10	1.15	0.30	1.838	473.9	38272
2	2.39	0.73	0.34	2.318	627.8	48792
3	4.71	1.34	0.25	1.365	397.6	29814
4	2.58	1.40	0.22	1.021	267.8	25933
5	3.65	0.76	0.19	0.677	334.4	27900
6	3.26	0.53	0.29	1.593	556.5	44047
7	4.23	1.18	0.39	3.121	382.2	44156
8	3.45	1.24	0.28	1.574	302.9	32859
9	5.00	1.02	0.32	2.116	528.8	41767
10	3.84	1.27	0.07	0.11	189.9	9195
11	2.19	0.85	0.16	0.529	439.4	24780
12	3.35	0.69	0.40	3.129	458.8	54031
13	2.29	0.56	0.23	1.031	694	37075
14	4.81	1.31	0.13	0.354	285.2	16241
15	4.90	0.79	0.21	0.864	583.9	31311
16	3.55	0.82	0.06	0.074	224.3	9365
17	2.77	1.44	0.10	0.193	187.8	11438
18	4.03	1.50	0.33	2.372	282.7	34286
19	3.74	1.47	0.17	0.647	192	19757
20	2.48	0.95	0.05	0.05	245.7	7553
21	3.16	1.05	0.38	2.88	365.1	45515
22	2.68	1.37	0.37	2.826	357.4	39719
23	3.94	0.89	0.31	1.912	428.8	41338
24	4.13	1.08	0.20	0.79	304.5	26077
25	3.06	1.11	0.15	0.469	247.1	20237
26	4.32	0.50	0.24	1.132	680.3	38647
27	4.52	0.98	0.08	0.143	231.8	12140
28	4.42	0.63	0.11	0.222	366.8	17265
29	2.87	0.60	0.12	0.269	352.6	19300
30	2.97	0.92	0.26	1.397	395.4	36750
31	2.00	1.21	0.14	0.411	324.6	19100
32	4.61	0.66	0.35	2.472	618.7	50062

TABLE 3.9 – Résultats du DOE et évaluation de 3 variables ( $M$ ,  $\sigma_e$  et  $Fr$ ) par EF pour le fil de bonding

Les surfaces de réponse des variables physiques de sortie sont données par la figure 3.21.

Les résultats montrent, pour les deux techniques d'approximation RPQ et RBF, que la qualité des méta-modèles est bonne pour la masse ( $M$ ) et pour la fréquence propre ( $Fr$ ). Par contre, ces deux techniques d'approximation ne donnent pas des méta-modèles précis pour la contrainte de Von-Mises (18% pour RBF et 22.7 % pour RPQ). En analysant les surfaces de réponse, on remarque que le comportement de la contrainte de Von-Mises est fortement non-linéaire. Ce qui explique en partie les erreurs élevées pour les méta-modèles de la contrainte de Von-Mises. Il est intéressant pour ce cas d'essayer d'autres techniques d'approximation telles que le krigeage, utilisé pour construire des méta-modèles non-linéaires pour le but de leur optimisation.

RBF	Moy.(%)	RMS (%)	Maxi.(%)
M	0.96	1.25	3.99
$\sigma_e$	6.8	8.28	17.96
Fr	0.82	1.01	2.27
RPQ	Moy. (%)	RMS (%)	Maxi.(%)
M	0.23	0.29	0.69
$\sigma_e$	6.89	9.06	22.68
Fr	0.69	0.81	1.42

TABLE 3.10 – *Évaluation des erreurs des surfaces de réponse*

#### 4.2.2 Optimisation géométrique du fil de bonding

Le problème d'optimisation ainsi que les résultats de l'optimisation sont résumés dans le tableau 3.11.

Variables	Limit.Inf	départ	Limit.Sup
d1(mm)	2	3.5	5
h1(mm)	0.5	1	1.5
e1(mm)	0.05	0.2	0.4
Contraintes	Limit.Inf		Limit.Sup
M(mg)			1.5
$\sigma_e$ (MPa)			350
Fr(Hz)	20000		30000
Objectifs	Direction	Echelle	Pondération
M(mg)	minimiser	3	1
$\sigma_e$ (MPa)	minimiser	700	1
Fr(Hz)	maximiser	40000	1.25
Résultats d'optim.	RBF	Directe	Err.(%)
d1(mm)	3.44	3.38	1.7
h1(mm)	0.86	0.71	21.1
e1(mm)	0.20	0.19	5.2
Fr(Hz)	28890	28612	1
M(mg)	0.79	0.68	16.1
$\sigma_e$ (Mpa)	317	333	4.8
Temps de calcul (s)	3	1560	

TABLE 3.11 – *Comparaison entre l'optimisation avec SR et celle avec la méthode directe pour le fil de bonding*

Les trois variables d'entrée du problème d'optimisation sont  $d_1$ ,  $h_1$  et  $e_1$ . Le domaine de variation de ces variables ainsi que le point de départ d'optimisation sont indiqués dans le tableau 3.11. Les variables de sortie sont la masse du fil de bonding  $M$ (mg), la contrainte de Von-Mises  $\sigma_e$ (MPa) et la première fréquence propre de vibration du fil  $Fr$ (Hz). Les contraintes d'optimisation sont également indiquées dans le tableau.

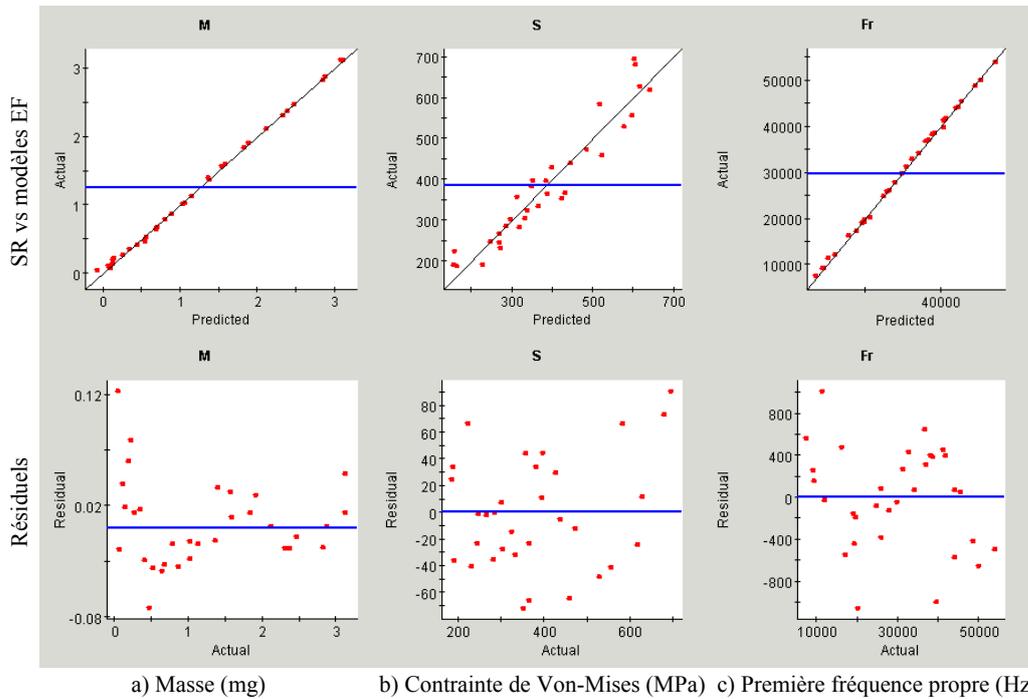


FIGURE 3.20 – Validation des SRs élaborées avec RBF pour le fil de bonding

Les objectifs de cette optimisation est de minimiser la masse et les contraintes de Von-Mises et de maximiser la première fréquence propre. L'algorithme NLPQL est également utilisé pour cette optimisation. Une mise à échelle pour uniformiser les fonctions objectifs et une pondération ont été effectuées.

Les mêmes paramètres d'optimisation ont été appliqués sur le méta-modèle établi par la méthode RBF et le modèle direct (CAO+EF).

Les résultats obtenus pour les points optimaux par les deux méthodes sont presque identiques. Une erreur relative de 1.7 % pour le paramètre  $d_1$ , 5.2 % pour  $e_1$ , mais de 21.1% pour  $h_1$ . Cette valeur élevée peut être justifiée par les faibles valeurs trouvées pour  $h_1$  ( 0.86 et 0.71 mm), ce qui donne une erreur absolue de 0.15 mm. La même remarque est à signaler pour le paramètre de sortie masse qui a une erreur relative 16.1 %. Les autres paramètres de sortie ont une erreur de 1% pour la fréquence propre et 4.8 % pour la contrainte de Von-Mises.

Pourtant la grande différence enregistrée est dans le temps de calcul qui est 3 secondes pour l'optimisation avec le méta-modèle et 1560 secondes pour l'optimisation directe. Le temps de calcul est ainsi 520 fois plus rapide pour la première méthode dans ce cas.

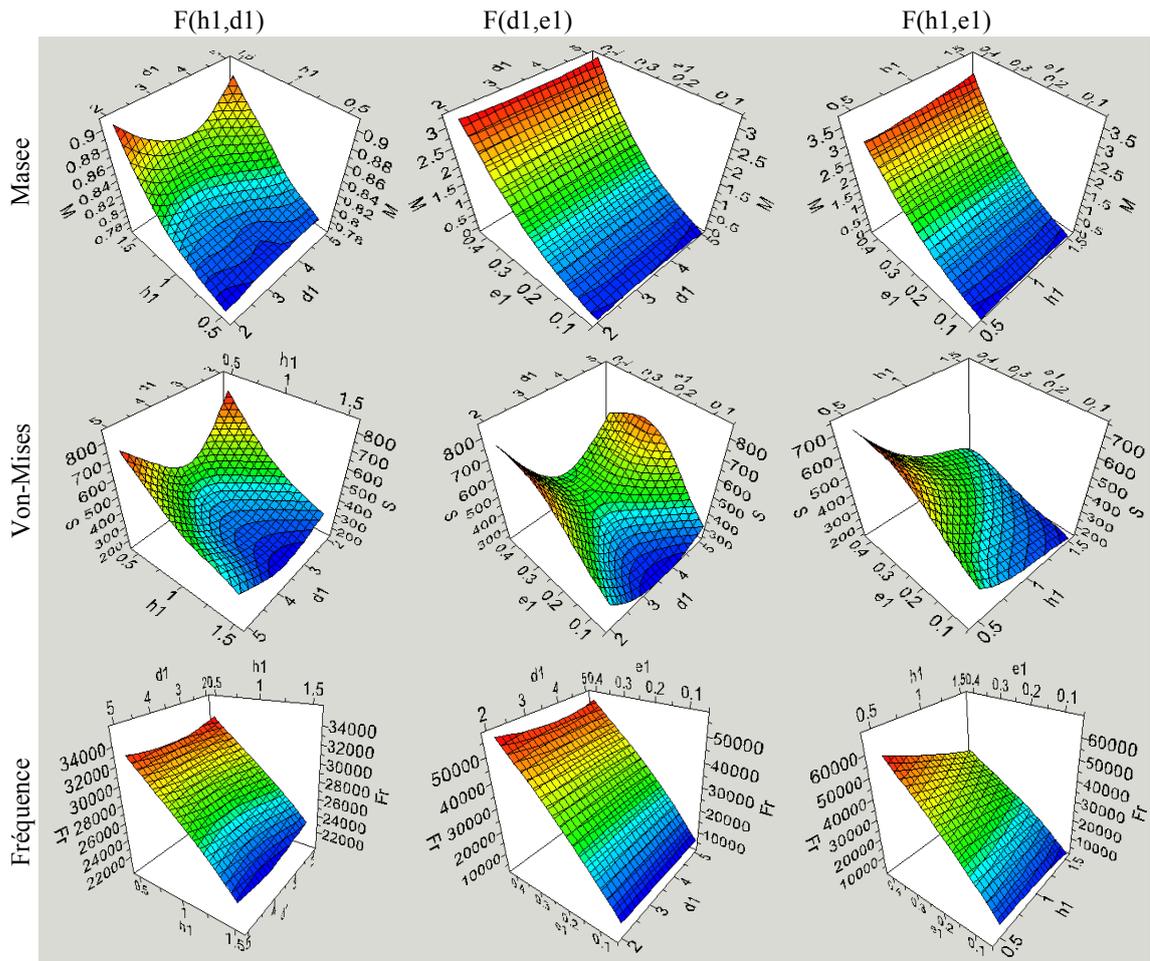


FIGURE 3.21 – Les surfaces de réponse physiques du fil de bonding

#### 4.2.3 Construction d'un méta-modèle pour la contrainte de Von-Mises

Le DOE et les résultats d'évaluation des contraintes de Von-Mises sont donnés par le tableau 3.12-a). Les approches RPQ et RBF ont également été utilisées pour construire deux méta-modèles approximatifs pour la contrainte de Von-Mises.

Le tableau 3.12-b) montre les erreurs pour les deux techniques.

Les résultats montrent que globalement le modèle RBF présente plus de précision que le modèle RPQ. Notons pourtant l'erreur maximale pour le modèle RPQ ne dépasse pas 1.6 %.

La figure 3.22 montre le taux d'ajustement des deux modèles RBF et RPQ par rapport au modèle EF ainsi que la dispersion des résidus pour les deux modèles. La

Iter.	$T_3(^{\circ}\text{C})$	$T_9(^{\circ}\text{C})$	$\sigma_e(\text{MPa})$
1	151	49	193
2	107	104	211
3	162	96	264
4	112	127	249
5	35	69	80
6	173	142	341
7	52	30	47
8	68	76	129
9	41	92	118
10	57	138	201
11	156	73	226
12	30	45	42
13	79	123	205
14	129	65	184
15	90	146	250
16	134	88	222
17	46	115	156
18	96	57	134
19	167	119	303
20	85	34	93
21	184	61	248
22	63	53	91
23	195	107	319
24	101	80	173
25	140	111	260
26	118	42	143
27	178	38	216
28	123	150	294
29	189	84	281
30	145	135	298
31	74	100	167
32	200	131	357

$\sigma_e$	Moy. (%)	RMS (%)	Maxi.(%)
RBF	0.12	0.19	0.47
RPQ	0.33	0.46	1.6

(b) Comparaison des erreurs des modèles de  $\sigma_e$  RBF et RPQ du fil de bonding

(a) DOE et évaluation par EF de la contrainte de Von-Mises

TABLE 3.12 – Élaboration et validation des méta-modèles pour la contrainte de Von-Mises

figure 3.22 montre également la surface de réponse de la contrainte de Von-Mises. La figure montre que cette réponse est linéaire par rapport aux deux températures  $T_3$  et  $T_9$ .

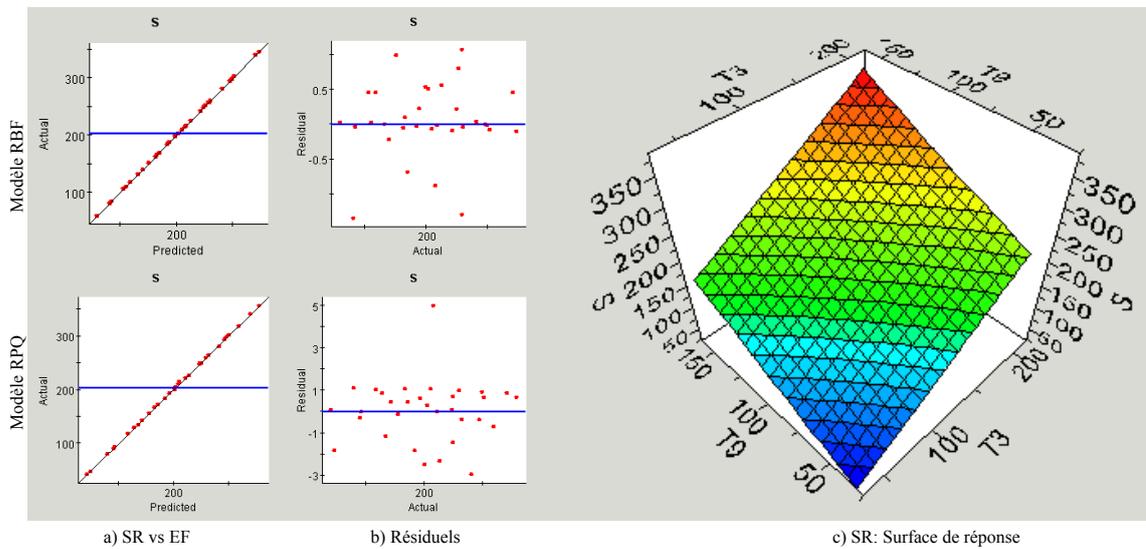


FIGURE 3.22 – Validation de la surface de réponse pour la contrainte de Von-Mises

Les coefficients du modèle polynômial de la surface de réponse de la contrainte de Von-Mises sont donnés par le tableau 3.13.

Termes du polynome	Coefficients
Constante	-52.7704
$T_3$	1.2165
$T_9$	1.2448
$T_3^2$	0.0002
$T_9^2$	0.0010
$T_3.T_9$	-0.0008

TABLE 3.13 – Modèle polynômial de la contrainte de Von-Mises

Comme pour le cas du convertisseur de puissance, la méta-modélisation par approximation a été utilisée pour les fils de bonding, pour établir des modèles compacts permettant l'optimisation géométrique et intégrable dans les niveaux amont de conception.

Dans la section suivante, nous traiterons le cas d'un couplage de deux méta-modèles pour le but d'une optimisation géométrique bi-niveau.

### 4.3 Optimisation géométrique bi-niveau

Dans cette section nous proposons d'effectuer une optimisation géométrique à deux niveaux. Le premier niveau correspond au niveau global d'optimisation géométrique, qui concerne le convertisseur de puissance et le deuxième niveau correspond à une optimisation géométrique locale pour le fil de bonding. Dans cette optimisation les méta-modèles géométriques établis dans les sections précédentes avec la méthode d'approximation RBF sont utilisés. La figure 3.23 montre le workflow iSIGHT de cette optimisation.

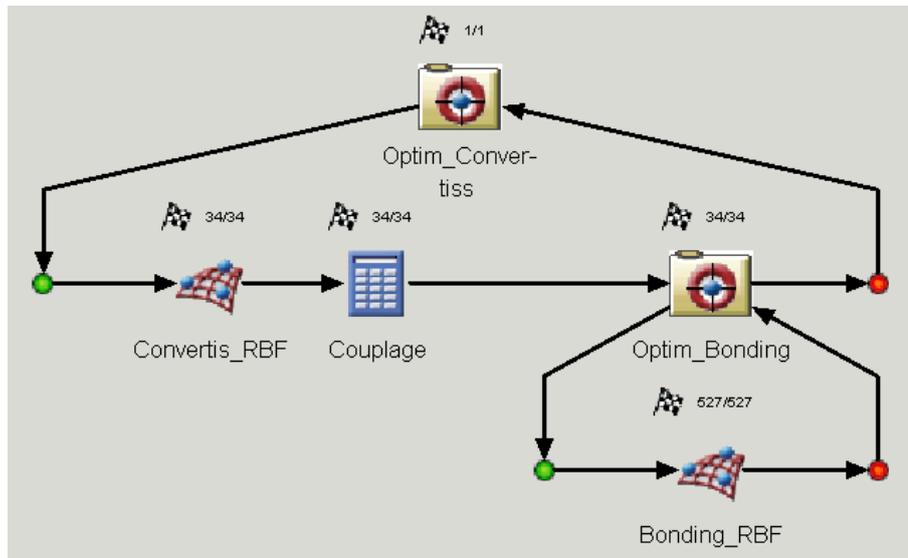


FIGURE 3.23 – Optimisation géométrique bi-niveau avec iSIGHT

Les variables du convertisseur de puissance sont des paramètres globaux. Ils n'apparaissent pas au niveau local du fil de bonding. Les variables du fil de bonding sont locales, elles interviennent au niveau local d'optimisation mais elles peuvent être utilisées au niveau de l'optimisation globale. Les paramètres géométriques au niveau global sont ainsi définis par  $[1 \leq X_1 \leq 4; 1 \leq X_2 \leq 4]$  et les paramètres géométriques au niveau local sont définis par  $[0.5 \leq h_1 \leq 2; 0.1 \leq e_1 \leq 0.4]$  avec une condition de couplage entre les paramètres  $X_1$  et  $d_1$  :  $d_1 = X_1 + 1.5mm$ .

Les contraintes d'optimisation sont définies au niveau global d'optimisation :  $A_r \leq 800 \text{ mm}^2$  ;  $T_3 \leq 140^\circ \text{ C}$  ;  $T_9 \leq 115^\circ \text{ C}$  et  $F_r \geq 20\text{kHz}$ .

Pour les deux niveaux d'optimisation le même algorithme d'optimisation NLPQL a été utilisé.

Durant le processus d'optimisation, pour chaque itération d'optimisation globale,

une nouvelle distance  $d_1$  est calculée et un processus d'optimisation locale est lancé pour maximiser la fréquence propre du fil de bonding. L'optimum global a été trouvé avec 34 itérations sur le méta-modèle du convertisseur de puissance et 527 itérations sur le méta-modèle du fil de bonding. Tout le processus d'optimisation a duré 30 secondes.

L'optimum global trouvé est défini par :  $X_1 = 2.79mm$ ;  $X_2 = 3.11mm$  pour le convertisseur de puissance et  $d_1 = 4.29mm$ ,  $e_1 = 0.18mm$  et  $h_1 = 0.93mm$  pour le fil de bonding.

Dans cette application, deux niveaux d'optimisation géométrique ont été considérés. Le niveau global d'optimisation détermine les valeurs de variables de couplage avec l'optimisation locale. Les variables locales d'optimisation peuvent intervenir au niveau global pour la définition des variables de conception, les contraintes ou les objectifs d'optimisation. Le même principe pourrait être appliqué sur plusieurs niveaux d'optimisation.

Cette application confirme l'avantage de l'utilisation des méta-modèles pour l'optimisation multi-niveau.

## 4.4 Intégration des méta-modèles dans Modelica

Les méta-modèles physiques générés au format polynômial pour le convertisseur de puissance et le fil de bonding ont été introduits dans le modèle Modelica du véhicule électrique (figure 3.24). La simulation au niveau système des températures et de la contrainte de Von-Mises durant le test de performance d'accélération est donnée par la figure 3.25.

Les simulations montrent que la température dans le transistor atteint  $186^\circ\text{C}$  et que la contrainte de Von-Mises dans le fil de bonding atteint  $321\text{MPa}$ . Ces deux résultats dépassent les limites définies par les exigences E2 et E1 qui sont déjà établies dans la phase de définition des exigences. Une solution est de réviser les exigences E2 et E1 de telle sorte que les nouvelles limites soient prise en compte. Ceci nécessite l'emploi des nouveaux matériaux et des composants capables de résister à ces limites, mais avec surcoût. Une autre solution est de réduire le courant qui atteint  $305\text{A}$  durant le test d'accélération. Mais la réduction du courant peut influencer la performance d'accélération qui est définie par l'exigence E3. D'où la nécessité d'une optimisation au niveau du système qui permet d'équilibrer le coût et la performance.

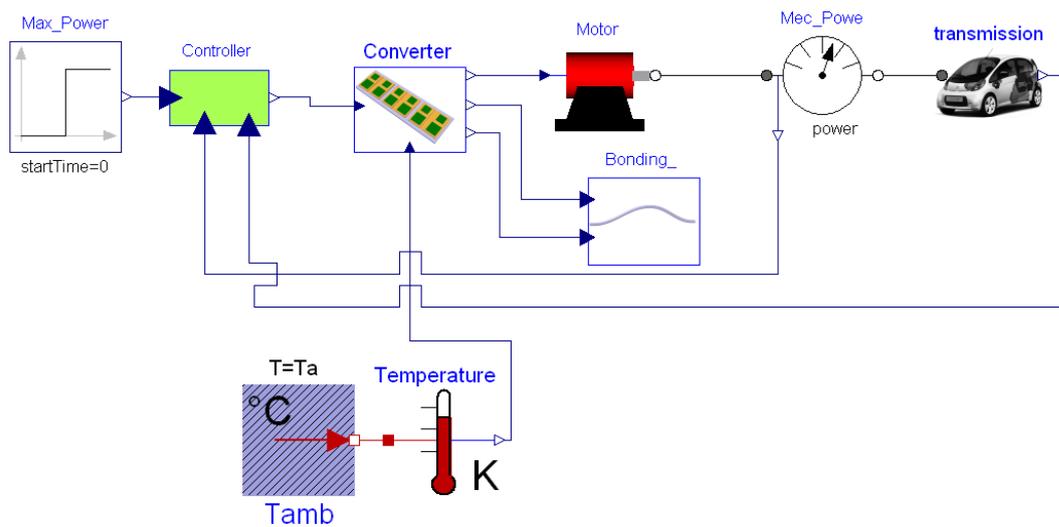


FIGURE 3.24 – Intégration des surfaces de réponse au niveau système

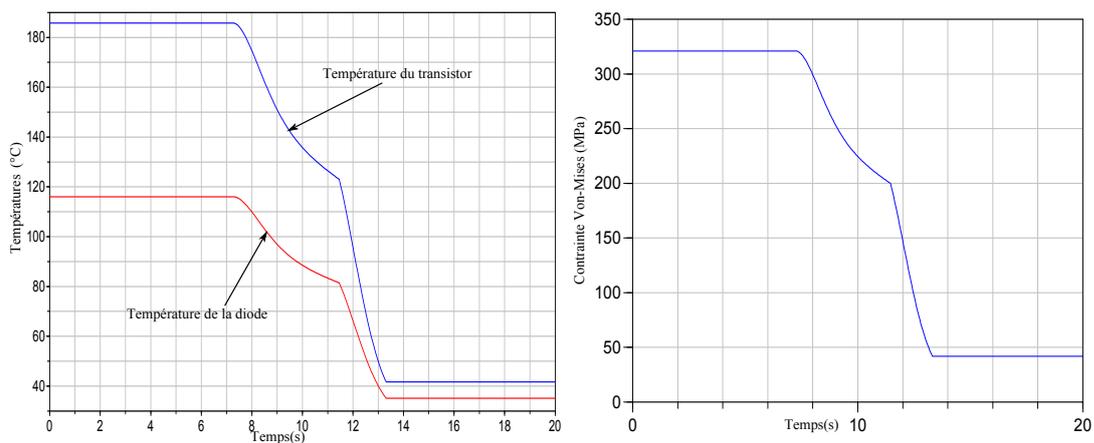


FIGURE 3.25 – Variation des températures et de la contrainte de Von-Mises après intégration au niveau système

## 5 Méta-modélisation au niveau système

Dans cette section nous proposons d'appliquer la technique de méta-modélisation par approximation pour le simulateur système qui est dans notre cas Dymola. Cette application permet d'extraire des méta-modèles qui peuvent être utilisés pour l'optimisation au niveau système et pour l'élaboration de modèles empiriques qui pourront être utilisés comme des évaluateurs au niveau conceptuel.

### 5.1 Élaboration des méta-modèles

La même démarche d'élaboration des méta-modèles par approximation a été utilisée. Le vecteur d'entrées est constitué de deux variables de conception qui sont : la puissance maximale du moteur électrique ( $Pe_{max}$ ) et le rapport de réduction global entre le moteur électrique et les roues ( $G_r$ ).

Les variables de sortie sont : la vitesse du véhicule mesurée à 10 secondes du test d'accélération et qui sera notée  $V_{100}$ , le courant d'alimentation du moteur ( $I_a$ ), la tension d'alimentation du moteur ( $V_o$ ), la vitesse maximale ( $w_{max}$ ) du moteur, sa vitesse critique ( $w_c$ ) et la température du transistor ( $T_3$ ).

Le tableau 3.14 donne les limites de variation de chacune de ces variables.

Le plan d'expériences LH optimal a été utilisé et des méta-modèles ont été construits en utilisant les deux techniques d'approximation RPQ et RBF.

Comme pour les études comparatives précédentes entre les deux méthodes, la méthode RBF montre globalement des erreurs légèrement inférieures aux modèles RPQ mais proches en amplitudes.

La figure 3.26 montre quelques résultats de cette étude sous formes de surfaces de réponse RBF.

L'analyse de ces surfaces montre un comportement non-linéaire de la vitesse  $V_{100}$  ainsi que l'existence d'un maximum qui dépend fortement du rapport de réduction  $G_r$  et faiblement des autres variables.

Une optimisation au niveau système permet de localiser le point optimal qui permet de maximiser  $V_{100}$ .

### 5.2 Optimisation au niveau système sur les méta-modèles

Le but de cette section est de faire une étude comparative entre l'optimisation sur le méta-modèle précédemment établi et l'optimisation sur le modèle Dymola du véhicule électrique pour localiser les paramètres optimaux permettant de maximiser la vitesse  $V_{100}$ . Il s'agit de trouver le meilleur rapport de réduction  $G_r$  qui permet

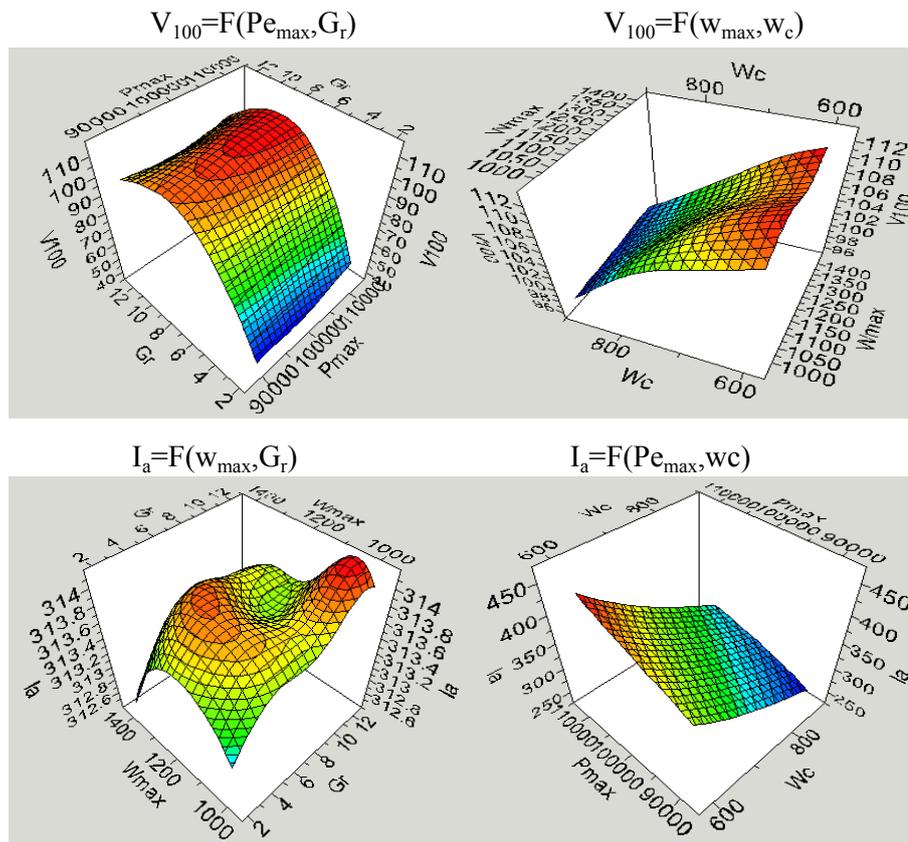


FIGURE 3.26 – Quelques surfaces de réponse pour la vitesse  $V_{100}$  et le courant  $I_a$

d'avoir une vitesse  $V_{100}$  proche de 100 km/h tout en minimisant la puissance maximale du moteur électrique.

Le tableau 3.14 donne les limites de variation de variables à optimiser, les contraintes, les objectifs et les résultats de l'optimisation.

Le rapport optimal de réduction trouvé par l'optimisation sur le méta-modèle est de 9.15 et celui donné par l'optimisation sur le modèle Dymola est de 10.1 avec une erreur relative de 9.4%. Le temps de calcul est de 4 secondes sur le méta-modèle et 332 secondes sur le modèle Dymola soit 83 fois plus rapide pour l'optimisation sur le méta-modèle.

Malgré l'erreur relative élevée, l'utilisation du méta-modèle pour l'optimisation permet un gain significatif sur le temps d'optimisation. Ce temps sera certainement plus remarquable dans le cas de l'optimisation d'un système mécatronique ayant un plus grand nombre de composants.

Variables	Imit.Inf	départ	limit.Sup
$Pe_{max}(W)$	90000	102000	110000
$G_r$	2	5	13
$V_{100}(km.h^{-1})$	95	105	105
Contraintes	Imit.Inf		limit.Sup
$I_a(A)$			300
$T_3(^{\circ}C)$			180
$W_{max}(rad.s^{-1})$	1100	1256	1400
$W_c(rad.s^{-1})$	600	700	900
$V_o(V)$	50	290	290
Objectifs	Direction	Échelle	Pondération
$G_r$	minimiser	13	1
$Pe_{max}(W)$	minimiser	110000	1
$V_{100}(km.h^{-1})$	maximiser	105	20
Résultats d'optim.	RBF	Directe	Err. (%)
$G_r$	9.15	10.1	9.4
$Pe_{max}(W)$	102373	96900	5.6
$W_c(rad.s^{-1})$	828	780	6.1
$W_{max}(rad.s^{-1})$	1100	1100	0
$I_a(A)$	297	298	0.3
$T_3(^{\circ}C)$	178	180	1.1
$V_{100}(km.h^{-1})$	99	98.5	0.5
$V_o(V)$	270	285	5.2
Temps de calcul (s)	4	332	

TABLE 3.14 – Comparaison entre l'optimisation avec le méta-modèle RBF et le modèle Dymola du véhicule électrique

### 5.3 Intégration des méta-modèles au niveau SysML

Il est possible d'extraire des modèles empiriques des méta-modèles élaborés au niveau système, en précisant les variables d'entrée et de sortie. Les modèles empiriques suivants ont été déduits à partir du méta-modèle élaboré avec la méthode RPQ pour le système véhicule électrique :

$$V_{100} = -81.29 + 19.G_r + 0.002.Pe_{max} - 0.0847.W_c + 0.0383.W_{max} - 1.1942.G_r^2 + 0.007.G_r.W_c + 0.0003.G_r.W_{max} \quad (3.6)$$

$$I_a = 319.55 + 0.321.G_r + 0.007.Pe_{max} - 0.884.W_c - 0.0046.G_r^2 \quad (3.7)$$

$$V_o = -201.37 + 71.27.G_r + 0.003.Pe_{max} - 0.227.W_c - 0.0127.W_{max} - 2.666.G_r^2 + 0.0152.G_r.W_c - 0.0024.G_r.W_{max} \quad (3.8)$$

$$T_3 = 188.58 + 0.459.G_r + 0.0055.Pe_{max} - 0.711.W_c + 0.0006.W_{max} \quad (3.9)$$

Ces modèles mathématiques simples peuvent être ajoutés au niveau conceptuel de modélisation en les insérant dans la modélisation physique de niveau P3 pour enrichir la modélisation de l'architecture physique du système effectuée avec SysML. Ces modèles peuvent également être utilisés comme des évaluateurs pour des futures conceptions. Ils permettent ainsi d'effectuer des optimisations dès le niveau conceptuel pour déterminer les paramètres optimaux avant de passer à la conception préliminaire ou détaillée.

## 6 Conclusion

Nous avons pu appliquer l'approche présentée au chapitre 2 sur le cas de modélisation d'un véhicule électrique. Le langage de modélisation Modelica a été utilisé pour la modélisation du système et la méta-modélisation par approximation a permis d'intégrer le comportement physique du convertisseur de puissance et du fil de bonding au niveau système.

L'approche commence par une phase conceptuelle en utilisant le langage de modélisation des systèmes SysML pour définir les exigences du système et modéliser son architecture physique. Puis dans une phase de conception préliminaire, le système a été modélisé avec Modelica dans le but d'analyser le comportement dynamique du véhicule et de vérifier le test de performance d'accélération. La méta-modélisation a été utilisée pour optimiser la géométrie du convertisseur de puissance et du fil de bonding et pour construire des modèles physiques compacts et précis permettant de simuler leur comportement physique au niveau système.

Modelica est un langage bien adapté pour la modélisation des véhicules électriques. La réutilisation des composants disponibles dans ses bibliothèques facilitent énormément la modélisation. La possibilité offerte par Modelica pour modéliser des éléments à partir des équations mathématiques permet de définir des nouveaux composants et de les réutiliser dans la modélisation du véhicule électrique. Toutefois, Modelica n'est pas adapté pour modéliser des phénomènes physiques couplés avec la géométrie du convertisseur de puissance ou du fil de bonding. Pour cela la technique de méta-modélisation par approximation a été utilisée.

Pour la construction des méta-modèles, des méthodes de régression polynomiale et les réseaux de neurones de fonctions à base radiale ont été utilisés. L'optimisation géométrique du convertisseur et du fil de bonding sur les méta-modèles permet un gain intéressant pour le temps de calcul sans trop être pénalisé sur la précision des

résultats. Les méta-modèles ont également été utilisés pour la localisation d'un point de départ des variables d'optimisation, pour guider le processus d'optimisation géométrique sur les modèles coûteux en temps de calcul. Ceci offre également un gain important sur le temps de calcul par rapport à une optimisation directe qui prend un point arbitraire pour le départ de l'optimisation.

Enfin l'approche de méta-modélisation est applicable pour le simulateur des systèmes Dymola ce qui permet d'effectuer des optimisations de niveau système et d'extraire des modèles empiriques exploitables au niveau conceptuel.



# Conclusion générale et perspectives

Cette thèse est consacrée à l'intégration de la modélisation et la simulation multi-physique dans le processus de conception mécatronique.

## **Problématique**

Les difficultés de cette intégration proviennent de diverses origines. Tout d'abord, la multi-pluridisciplinarité de la mécatronique impose l'utilisation de différents types de modèles et de différentes techniques de résolution numérique pour définir et résoudre des modèles : continus, discrets, événementiels, déterministes, stochastiques, etc. Ainsi, cette variabilité de modèles oblige les concepteurs à distribuer leur travail sur plusieurs outils informatiques adaptés aux différents niveaux d'abstraction de modélisation, engendrant des problèmes d'interopérabilité. Aussi, l'optimisation d'un système mécatronique est une tâche très difficile qui nécessite d'adopter une démarche rigoureuse de conception dès le début du processus de conception pour pouvoir tirer profit de l'intégration synergique entre les disciplines de la mécatronique.

## **Contributions**

Dans cette thèse nous avons proposé une approche de conception mécatronique en cohérence avec les activités d'ingénierie système intégrant facilement la simulation multi-physique dans le processus de conception pour la vérification et la validation de la modélisation. Cette approche se base sur l'utilisation d'une plateforme constituée de trois catégories d'outils de modélisation et de simulation.

La première catégorie est un outil de modélisation pour l'ingénierie système basé sur le langage SysML pour l'analyse des exigences, la modélisation logique et fonctionnelle du système. SysML sera également utilisé pour la modélisation de l'architecture physique dans son plus haut niveau de conception (niveau conceptuel).

La deuxième catégorie est un outil de modélisation et simulation multi-domaine : Modelica, pour la vérification par simulation des performances du système.

La troisième catégorie est un ensemble de logiciels de modélisation et de simulation

de niveau détaillé tels que la CAO mécanique et électronique, la simulation CEM et l'analyse par EF. Le couplage multi-physique est assuré par les méta-modèles (modèles de substitution). Les méta-modèles multi-physiques sont alors intégrés dans l'environnement de simulation multi-domaine pour assurer le couplage multi-disciplinaire.

L'approche proposée se présente comme une succession itérative d'un processus de conception commençant par une phase de définition et d'analyse des exigences, suivie d'une phase de modélisation et d'analyse fonctionnelle et logique, et qui se termine par une phase de modélisation et de simulation multi-physique. Le retour d'expériences des simulations multi-physiques est récupéré sous forme de méta-modèles qui enrichissent le modèle de vérification du système mécatronique dans les itérations suivantes de conception. Ceux-ci permettent également d'extraire de nouvelles exigences systèmes ouvrant la voie à une nouvelle modélisation fonctionnelle, logique et physique. A chaque itération, le niveau de maturité de la conception est amélioré jusqu'à aboutir à la conception finale du système mécatronique.

Cette approche a été appliquée au cas de modélisation d'un véhicule électrique. Les exigences et l'architecture physique ont été définies avec le langage de modélisation SysML qui a également été utilisé pour définir les variables locales, les variables de couplages et les variables globales du système. Puis le test de performance d'accélération du véhicule a été vérifié avec le langage de modélisation Modelica. La technique de méta-modélisation par approximation a été appliquée pour extraire des méta-modèles géométriques et physiques pour le convertisseur de puissance et le fil de bonding. Les méta-modèles géométriques ont alors été utilisés pour l'optimisation géométrique des composants, et les méta-modèles physiques ont été insérés dans le modèle global du véhicule électrique.

### **Avantages**

Les résultats obtenus ont montré plusieurs avantages pour l'approche adoptée :

- l'association du langage SysML avec la technique de méta-modélisation constitue une solution intéressante pour assurer et exploiter le retour d'expériences du processus de conception en phases amont de conception ;
- Modelica supporte la majorité des types de modèles nécessaires à la modélisation mécatronique ;
- la méta-modélisation par approximation complète les limitations de Modelica devant la simulation-multi-physique 3D ;
- en termes d'interopérabilité, l'emploi des méta-modèles approximatifs supprime

- la dépendance des modèles avec leurs outils de modélisation et facilite l'échange de modèles ;
- les méta-modèles permettent également une flexibilité d'échange des modèles entre les niveaux de conception détaillée et les niveaux de conception préliminaire et conceptuel ;
  - en termes de travail collaboratif, les méta-modèles offrent une meilleure répartition des tâches de conception, qui permet aux spécialistes d'être plus indépendants pour se focaliser sur les travaux de valeur ajoutée ;
  - ils permettent également une meilleure exploitation de l'expertise des spécialistes par les autres concepteurs ;
  - en phase de conception préliminaire, les méta-modèles permettent d'explorer la conception par analyse de la sensibilité des variables de conception ;
  - en optimisation multi-disciplinaire, l'emploi des méta-modèles permet d'effectuer facilement le couplage entre les disciplines ;
  - la substitution des codes de calculs experts, difficiles à manipuler pour des concepteurs non experts, par les méta-modèles permet de simplifier la complexité de l'optimisation multi-objectif et de réduire le temps de calcul ;
  - enfin, l'optimisation avec les méta-modèles permet de coupler des optimisations globales et locales ce qui offre une flexibilité d'optimisation.

### Défis

Pour réussir cette démarche, l'ingénieur système et toute l'équipe de conception concernée définissent, dans la mesure du possible, les variables d'entrée, de sortie et de couplage entre les disciplines et les physiques qui constituent le système en utilisant le langage de modélisation SysML pour la modélisation et la mise à jour de l'architecture physique dans son plus haut niveau d'abstraction. Après, les tâches de modélisation et de simulation sont réparties entre les concepteurs suivant leurs disciplines, leurs champs d'expertise et les outils de modélisation qu'ils maîtrisent. Cette répartition est effectuée suivant un plan global qui permet d'effectuer des optimisations multi-disciplinaires par la suite. Chaque concepteur effectue ses simulations et élabore les méta-modèles nécessaires qui seront intégrés dans le modèle du système global pour la vérification avec l'outil de simulation multi-domaine.

Pour construire les méta-modèles, le concepteur définit les variables d'entrée, choisit un plan d'expériences adapté avec les simulations qu'il effectue, construit les méta-modèles et les valide en analysant les erreurs par rapport aux résultats de simulations obtenus avec les modèles directs. Le nombre de variables de conception et le nombre de méta-modèles à utiliser sont à définir suivant la complexité du pro-

blème et la précision demandée. Ces tâches peuvent être facilitées par l'utilisation d'un logiciel d'automatisation et d'intégration des processus de simulation tel que iSIGHT.

Pour réussir ce type d'études, nous donnons quelques remarques sur le rôle de l'ingénieur en conception mécatronique. Sans être un spécialiste dans chacune des disciplines, un ingénieur en conception mécatronique doit avoir une culture dans plusieurs domaines, notamment en conception des systèmes complexes, en optimisation multi-disciplinaire et dans la connaissance des outils informatiques.

Dans le domaine de la conception des systèmes complexes, l'ingénieur en conception mécatronique doit être capable d'organiser le processus de conception du système en ayant une bonne vue d'ensemble sur l'organisation du système, les disciplines impliquées et la manière dont elles interagissent entre elles. Pour chacune des disciplines, l'ingénieur en conception mécatronique doit être capable d'identifier les physiques impliquées pour modéliser le comportement du système.

Dans le domaine de l'optimisation multi-disciplinaire, l'ingénieur en conception mécatronique doit avoir une connaissance des différents algorithmes d'optimisation existant et il doit être capable de les adapter aux différents cas de conception.

L'ingénieur en conception mécatronique doit avoir une bonne connaissance des environnements informatiques adaptés à la conception des systèmes complexes. Pour les codes de calcul de haute fidélité utilisés pour modéliser le comportement physique des éléments du système mécatronique, l'ingénieur en conception mécatronique doit connaître les principes de ces codes, leurs entrées et leurs sorties. Par contre, l'ingénieur en conception mécatronique doit être capable de développer les méta-modèles fiables qui se substituent aux codes de calcul de haute fidélité, qui ne sont pas toujours adaptés pour l'optimisation multi-disciplinaire.

Pour le développement de méta-modèles fiables, une connaissance des techniques d'élaboration des plans d'expériences est nécessaire. Dans cette thèse, la méthode Latin Hypercube a été utilisée. Elle fournit le plus d'informations au sein d'un espace de conception réduit, avec une répartition uniforme des échantillons. Il est également nécessaire de connaître les techniques de construction des méta-modèles. Dans cette thèse, deux techniques ont été utilisées : la régression polynomiale et les réseaux de neurones de fonctions à base radiale (RBF). La première a l'avantage de fournir des méta-modèles faciles à inter-changer entre les outils de modélisation. La deuxième présente une meilleure précision pour certains problèmes non-linéaires.

### **Limites**

En dépit des avantages cités, les méta-modèles ne sont valides qu'à l'intérieur d'une petite région de confiance, mais sur une région plus large il est toujours possible de trouver un ensemble de méta-modèles valides. Certains outils de modélisation multi-domaine tels que Modelica ne supportent actuellement que les méta-modèles polynomiaux. Par conséquent les méta-modèles élaborés avec RBF ou Krigeage ne sont pas supportés. Par contre, ils sont supportés par d'autres outils de modélisation multi-domaine tels que Simulink.

### **Perspectives**

Des techniques d'approximation telles que le Krigeage et le Support Vector Machine (SVM) n'ont pas été suffisamment étudiées dans cette thèse, elles pourraient être également utilisées dans la plateforme de conception proposée.

Les méta-modèles étudiés dans cette thèse sont limités à des problèmes en régime permanent. D'autres techniques telles que la méthode de réduction de modèles par projection modale pourraient étendre ces travaux pour les phénomènes à temps de réponse rapide.

La partie récupération des données de simulation par l'outil d'ingénierie système SysML et le système d'information qui assure la communication entre les différents collaborateurs de conception, n'ont pas été développés dans cette thèse. Ils pourraient faire l'objet d'un autre travail de recherche.

### **Conclusion finale**

Enfin, une solution a été proposée à la problématique centrale de cette thèse concernant l'intégration de la modélisation et la simulation multi-physique dans le processus de conception des systèmes mécatroniques. Pour les outils, nous avons proposé l'emploi d'une plateforme intégrée de conception (Platform-Based Design). Pour la méthode, notre solution se base sur l'emploi de la technique de méta-modélisation pour extraire des méta-modèles et les intégrer dans des outils de simulation multi-domaine. Les méta-modèles sont également intégrés au niveau ingénierie système, en organisant la conception autour des métriques (Metric-Based Design). Pour la communication entre les différents collaborateurs, le modèle conceptuel pourrait être utilisé comme un support, en l'associant à un système d'information basé sur les valeurs des métriques (Value-Based Information System).

CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

---

# Glossaire

ABS	Anti-Blocking System	3, 13
AC	Alternative Current	19
AE	Algebraic Equations	29, 30, 44
AMDEC	Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité	26
AMS	Analog Mixed Signal	4, 26– 28, 43, 47
AP	Application Protocol	36
BDD	Block Definition Diagram	24, 25, 72, 73
BLISS	Bi-Level Integrated System Synthesis	69
CAN	Computer Area Network	12
CAO	Conception Assistée par Ordinateur	28, 31, 36, 64, 67, 68, 80, 87
CEM	Compatibilité Électro-Magnétique	12, 18, 21, 22, 68
DAE	Differential Algebraic Equations	29, 30, 44, 63
DBC	Direct Bonded Copper	81
DBM	Dynamic Behavior Modeling	34
DC	Direct Current	19

DIVE	Disciplinary Interaction Variable Elimination	69
DOE	Design Of Experiments	48, 50, 83, 89, 94, 99
DoE	US Department of Energy	32
DS	Dassault Systèmes	1, 28, 34
ECP	École Centrale Paris	1
EF	Éléments Finis	5, 45, 46, 87, 89, 94
ENIS	École Nationale d'Ingénieurs de Sfax	1
ENSEA	École Nationale Supérieure de l'Électronique et de ses Applications	1
ESP	Electronic Stability Program	3
GMPE	Groupe MotoPropulseur Électrique	13
GSE	Global Sensivity Equations	69
IBD	Internal Block Diagram	25
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor	19, 20, 75, 83
INCOSE	International Council on Systems Engineering	24, 32
IS	Ingénierie Système	5, 36, 67
ISO	International Organization for Standardiza- tion	36
LH	Latin Hypercube	51, 52, 83, 89, 105
LISMMA	Laboratoire d'Ingénierie des Systèmes Méca- niques et des MATériaux	1
MDA	Model-Driven Architecture	42
MDF	Méthode des Différences Finies	5
MDO	Multi-Disciplinary Optimization	68

---

MEF	Méthode d'Éléments Finis	5, 44
MEMS	MicroElectroMechanical Systems	46
MMO	Méta-Modélisation et Optimisation	66, 68
MOF	Meta-Object Facility	42, 43
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor	19, 20
Mov'eo	Pôle de compétitivité en recherche et développement automobile et transports publics	1
MSMD	Modélisation et Simulation Multi-Domaine	66, 67
MVF	Méthode des Volumes Finis	5
NLPQL	Non-Linear Programming by Quadratic Lagrangian	88, 97, 102
O2M	Outils de Modélisation Mécatronique	1, 26
ODE	Ordinary Differential Equations	29, 30, 44, 45, 63
OMG	Object Management Group	24, 42, 43
PCB	Printed Circuit Board	31
PDE	Partial Differential Equations	29, 30, 44, 45, 54
PLM	Product Lifecycle Management	28
POD	Proper Orthogonal Decomposition	6, 115
RBF	Radial Basis Function	53, 54, 83, 85, 87, 89, 95, 97, 99, 102, 105
RMS	Root Mean Square	49, 85, 91

RPQ	Régression Polynomiale Quadratique	53, 83, 85, 89, 95, 99, 105, 108
SQP	Sequential Quadratic Programming	88
SR	Surfaces de Réponse	47
STEP	STandard for the Exchange of Product model data	36, 37, 81
SUPELEC	École supérieure d'électricité	1
SUPMECA	Institut Supérieur de Mécanique de Paris	1
SVM	Support Vector Machine	115
SysML	Systems Modeling Language	24–26, 43, 63, 66, 67, 72, 73, 108, 115
U2MP	Unité de Mécanique, Modélisation et Produc- tique	1
UML	Unified Modeling Language	24, 42, 43, 67
VE	Véhicules Electriques	12
VHDL	VHSIC Hardware Description Language	4, 26– 28, 43, 47
VHE	Véhicules Hybrides Électriques	12, 19
VHSIC	Very High Speed Integrated Circuits	4
XMI	XML Metadata Interchange	36, 43, 67
XML	eXtensible Markup Language	36, 37, 43

# Bibliographie

- [ALAM *et al.* 04] F. M. ALAM, K. R. MCNAUGHT & T. J. RINGROSE, « A comparison of experimental designs in the development of a neural network simulation metamodel », *Simulation Modelling Practice and Theory*, vol. 12, 559–578, 2004.
- [ALEXANDROV & ROBERT 00] N. M. ALEXANDROV & L. M. ROBERT, « Analytical and computational aspects of collaborative optimization », Rapport technique 210104, NASA Langley Research Center, 2000.
- [ALTUS 02] T. D. ALTUS, « A Response Surface Methodology for Bi-Level Integrated System Synthesis (BLISS) », Rapport technique 211652, NASA Langley Research Center, 2002.
- [ANDRADE *et al.* 10] E. ANDRADE, P. MACIEL, B. NOGUEIRA, C. ARAUJO & G. CALLOU, « A COTS-based approach for estimating performance and energy consumption of embedded real-time systems », *Information Processing Letters*, vol. 110, 525–534, 2010.
- [BANDLER & GRINDER 75] R. BANDLER & J. GRINDER, *The Structure of Magic*, vol. 1, Science and Behavior Books, 1975.
- [BATILL *et al.* 99] S. M. BATILL, M. A. STELMACK & X. Q. YU, « Multidisciplinary design optimization of an electric-powered unmanned air vehicle », *Aircraft Design*, vol. 2, 1–18, 1999.
- [BECHTOLD 05] T. BECHTOLD, *Model Order Reduction of Electro-Thermal MEMS*, Thèse de doctorat, Albert-Ludwigs Universität Freiburg, 2005.
- [BEERS 05] W. C. M. V. BEERS, *Kriging Metamodeling for Simulation*, Thèse de doctorat, Universiteit van Tilburg, 2005.
- [BISHOP & RAMASUBRAMANIAN 02] R. H. BISHOP & M. K. RAMASUBRAMANIAN, *The mechatronics hand book*, CRC Press LLC, 2002.
- [BLANNING 75] R. BLANNING, « The construction and implementation of metamodels », *Simulation*, vol. 24, n° 6, 177–184, 1975.

- [BOEHM 88] B. W. BOEHM, « A Spiral Model of Software Development and Enhancement », *IEEE Computer*, vol. 21, 61–72, 1988.
- [BOLTON 99] W. BOLTON, *Mechatronics : Electrical Control Systems in Mechanical and Electrical Engineering*, Addison-Wesley Longman, 1999.
- [BOUCHER & HOULIHAN 08] M. BOUCHER & D. HOULIHAN, « System design : new product development for mechatronics », Rapport technique, Aberdeen Group, 2008.
- [BOX & DRAPER 07] G. E. P. BOX & N. R. DRAPER, *Response Surfaces, Mixtures, and Ridge Analyses*, John Wiley & Sons, 2007.
- [BOX & WILSON 51] G. E. P. BOX & K. B. WILSON, « On the experimental attainment of optimum conditions (with discussion) », *Journal of the Royal Statistical Society*, vol. Series B, 13, 1–45, 1951.
- [BUEDE 09] D. M. BUEDE, *The engineering design of systems : models and methods*, Wiley, 2009.
- [BUHMANN 04] M. D. BUHMANN, *Radial Basis Functions : Theory and Implementations*, Cambridge university Press, 2004.
- [CABRERA *et al.* 10] A. A. CABRERA, M. FOEKEN, O. TEKIN, K. WOESTENENK, M. ERDEN, B. D. SCHUTTER, M. VAN TOOREN, R. BABUSKA, F. VAN HOUTEN & T. TOMIYAMA, « Towards automation of control software : A review of challenges in mechatronic design », *Mechatronics*, vol. 20, n° 8, 876 – 886, 2010.
- [CANTOR *et al.* 08] B. CANTOR, P. GRANT & C. JOHNSTON (dir.), *Automotive Engineering Lightweight, Functional, and Novel Materials*, Taylor and Francis Group, 2008.
- [CHRISTOPHE *et al.* 10] F. CHRISTOPHE, A. BERNARD & E. . COATANE, « RFBS : A model for knowledge representation of conceptual design », *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 59, 155–158, 2010.
- [COLOSTATE 11] COLOSTATE, « Definitions of "Mechatronics" », 2011, URL <http://www.mechatronics.colostate.edu/definitions.html>. {Visiter le 25 septembre 2011}
- [CRAIG 09] K. CRAIG, « Mechatronic System Design », Rapport technique, ASME Newsletter, 2009.
- [CRAIG & C.C. BAMPTON 68] R. R. CRAIG & M. C.C. BAMPTON, « Coupling of Substructures for Dynamic Analysis », *AIAA Journal*, vol. 6 (7), 1313–1319, 1968.
- [DAVID *et al.* 10] P. DAVID, V. IDASIAK & F. KRATZ, « Reliability study of complex physical systems using SysML », *Reliability Engineering and System Safety*, vol. 95, 431–450, 2010.

- 
- [DoD 01] DoD, « Systems Engineering Fundamentals », Rapport technique, Department of Defense, 2001.
- [EHSANI *et al.* 09] M. EHSANI, Y. GAO, S. E. GAY & A. EMADI, *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles : Fundamentals, Theory, and Design*, CRC Press, 2009.
- [EJJABRAOUI 10] K. EJJABRAOUI, *Contribution à la conception de systèmes mécatroniques automobiles : méthodologie de pré-dimensionnement multi-niveau multi-physique de convertisseurs statiques*, Thèse de doctorat, UPS, 2010.
- [ELMQVIST *et al.* 98] H. ELMQVIST, S. MATTSSON & M. OTTER, « Modelica : The New Object-Oriented Modeling Language », in *The 12th European Simulation Multiconference*, Manchester, UK, 1998.
- [EMM 10] EMM, « 8<sup>èmes</sup> rencontres européennes de Mécatronique », Rapport technique, European Mechatronics Meeting, 2010, URL <http://www.emm-mechatronics.eu/sts/www-emm-mechatronics-eu/fch/ds/134.pdf>.
- [FRANCO 08] J. FRANCO, *Planification d'expériences numériques en phase exploratoire pour la simulation des phénomènes complexes*, Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, 2008.
- [GOEL *et al.* 07] T. GOEL, R. VAIDYANATHAN, R. T. HAFTKA, W. SHYY, N. V. QUEIPO & K. TUCKER, « Response surface approximation of Pareto optimal front in multi-objective optimization », *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 196, 879–893, 2007.
- [GUIHAL 07] D. GUIHAL, *Modélisation en langage VHDL-AMS des systèmes pluridisciplinaires*, Thèse de doctorat, Université Toulouse III, 2007.
- [GUYAN 65] R. J. GUYAN, « Reduction of stiffness and mass matrices », *AIAA Journal*, vol. 3 (2), 138, 1965.
- [HAMMADI *et al.* 11] M. HAMMADI, J.-Y. CHOLEY, O. PENAS, J. LOUATI, A. RIVIÈRE & M. HADDAR, « Layout optimization of power modules using a sequentially coupled approach », *International Journal of SIMulation Modelling*, vol. 10, n° 3, 122–132, 2011.
- [HARASHIMA *et al.* 96] F. HARASHIMA, M. TOMIZUKA & T. FUKUDA, « Mechatronics- What is it, why, and how? - an editorial », *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 1, 1–4, 1996.
- [HARDY 71] R. L. HARDY, « Multiquadratic Equations of Topology and Other Irregular Surfaces », *Journal of Geophysical Research*, vol. 76, 1905–1915, 1971.
- [HASKINS 06] C. HASKINS, « Systems engineering handbook : a guide for system life cycle processes and activities, version 3 », Rapport technique, INCOISE, 2006.

- [IEEE 04] IEEE, « Adoption of ISO/IEC 15288 :2002 Systems Engineering - System Life Cycle Processes », Rapport technique, IEEE Computer Society, 2004.
- [JIN *et al.* 01] R. JIN, W. CHEN & T. SIMPSON, « Comparative studies of metamodeling techniques under multiple modelling criteria », *Structural and Multidisciplinary Optimization*, vol. 23, 1–13, 2001.
- [KHURI 05] A. I. KHURI, *Response surface methodology and related topics*, World Scientific, 2005.
- [KRIGE 51] D. KRIGE, « A statistical approach to some basic mine valuation problems on the witwatersrand », *Journal of the Chemical, Metallurgical and Mining Society*, vol. 52, 119–139, 1951.
- [KYURA & OHO 96] N. KYURA & H. OHO, « Mechatronics-an industrial perspective », *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 1, 10 –15, 1996.
- [LARMINIE & LOWRY 03] J. LARMINIE & J. LOWRY, *Electric Vehicle Technology Explained*, John Wiley & Sons, 2003.
- [LAURENCEAU 08] J. LAURENCEAU, *Surfaces de réponse par krigeage pour l'optimisation de formes aérodynamiques*, Thèse de doctorat, Mécanique Energétique Génie Civil et Procédés, 2008.
- [LIANG *et al.* 11] Y. LIANG, X. QUAN CHENG, Z. NENG LI & J. WU XIANG, « Robust multi-objective wing design optimization via CFD approximation model », *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, vol. 5, 286–300, 2011.
- [MACKAY *et al.* 79] M. D. MACKAY, R. J. BECKMAN & W. J. CONOVER, « A comparison of three methods for selecting values of input variables in the analysis of output from a computer code », *Technometrics*, vol. 21, 239–245, 1979.
- [MARTIN *et al.* 04] C. MARTIN, J. SHANNEN & R. PASTERCZYK, « Inside a Power Module », *IEEE transactions on power electronics*, vol. 4, 1519–1525, 2004.
- [MASMOUDI & PARTE 06] M. MASMOUDI & Y. S. PARTE, « Disciplinary interaction variable elimination (DIVE) approach for MDO », in *European Conference on Computational Fluid Dynamics*, 2006.
- [MATHERON 62] G. MATHERON, *Traité de géostatistique appliquée Tome I. Mémoires du Bureau de Recherches Géologiques et Minières, No.14*, Editions Technip, 1962.
- [MATHERON 63] G. MATHERON, *Traité de géostatistique appliquée Tome II : Le Krigeage. Mémoires du Bureau de Recherches Géologiques et Minières, No.14*, Editions B.R.G.M, 1963.

- 
- [MCCULLOCH & PITTS 43] W. MCCULLOCH & W. PITTS, «A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity», *Bulletin of Mathematical Biophysics*, vol. 7, 115 – 133, 1943.
- [OMG 06] OMG, «Meta Object Facility (MOF) Core Specification», Rapport technique, OMG Available Specification, 2006.
- [PAHLAND *et al.* 07] G. PAHLAND, W. BEITZ, J. FELDHUSEN & K.-H. GROTE, *Engineering Design : A Systematic Approach*, Springer, 3<sup>e</sup> édition, January 2007.
- [PAREDIS *et al.* 10] C. J. PAREDIS, Y. BERNARD, R. M. BURKHART, H.-P. DE KONING, S. FRIEDENTHAL, P. FRITZSON, N. F. ROUQUETTE & W. SCHAMAI, «An Overview of the SysML-Modelica Transformation Specification», Rapport technique, OMG, 2010.
- [PAREDIS & JOHNSON 08] C. J. J. PAREDIS & T. JOHNSON, «Using OMG'S SysML to support simulation», in *Proceedings of the 2008 Winter Simulation Conference*, 2008.
- [PARK & SANDBERG 91] J. PARK & I. SANDBERG, «Universal Approximation Using Radial-Basis-Function Network», *Neural Computation*, vol. 3, 246–257, 1991.
- [PAYNTER 61] H. M. PAYNTER, *Analysis and Design of Engineering Systems*, M.I.T Press, 1961.
- [PELZ 03] G. PELZ, *Mechatronic Systems - Modelling and Simulation with HDLs*, WILEY, 2003.
- [PICHENY 09] V. PICHENY, *Improving accuracy and compensating for uncertainty in surrogate modeling*, Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines - Saint-Etienne, 2009.
- [POP 08] A. POP, *Integrated Model-Driven Development Environments for Equation-Based Object-Oriented Languages*, Thèse de doctorat, Linköpings universitet, Sweden, 2008.
- [POP *et al.* 07] A. POP, D. AKHVLEDIANI & P. FRITZSON, «Towards Unified Systems Modeling with the ModelicaML UML Profile», in L. U. ELECTRONIC (dir.), *International Workshop on Equation-Based Object-Oriented Languages and Tools*, 2007.
- [POWEL 85] M. POWEL, «Radial basis functions for multi-variable interpolation : A review», in *IMA Conference on Algorithms for the Approximation of Functions and Data*, 1985.
- [REN & CHEN 10] W.-X. REN & H.-B. CHEN, «Finite element model updating in structural dynamics by using the response surface method», *Engineering Structures*, vol. 32, 2455–2465, 2010.

- [RGUIG 05] M. RGUIG, *Méthodologie des surfaces de réponse pour l'analyse en fiabilité des plates-formes pétrolières offshore fissurées*, Thèse de doctorat, UNIVERSITÉ DE NANTES, 2005.
- [RZEVSKI 03] G. RZEVSKI, « On conceptual design of intelligent mechatronic systems », *Mechatronics*, vol. 13, 1029–1044, 2003.
- [SASENA 02] M. J. SASENA, *Flexibility and Efficiency Enhancements for Constrained Global Design Optimization with Kriging Approximations*, Thèse de doctorat, University of Michigan, 2002.
- [SCHITTKOWSKI 85] K. SCHITTKOWSKI, « Nlpql : a fortran subroutine solving constrained nonlinear programming problems », *Annals of Operations Research*, vol. 5 (1-4), 485–500, 1985.
- [SHETTY & KOLK 97] D. SHETTY & R. KOLK, *Mechatronics system design*, PWS Publishing Company, 1997.
- [SHYY *et al.* 01] W. SHYY, NILAYPAPILA, R. VAIDYANATHAN & K. TUCKER, « Global design optimization for aerodynamics and rocket propulsion components », *Progress in Aerospace Sciences*, vol. 37, 59–118, 2001.
- [SIEMERS *et al.* 09] A. SIEMERS, D. FRITZSON & I. NAKHIMOVSKI, « General meta-model based co-simulations applied to mechanical systems », *Simulation Modelling Practice and Theory*, vol. 17, 612–624, 2009.
- [SOBIESKI 88] J. S. SOBIESKI, « Bi-level integrated system synthesis (BLISS) », Rapport technique 208715, NASA Langley Research Center, 1988.
- [SOBIESKI 91] J. S. SOBIESKI, « A system approach to aircraft optimization », Rapport technique 104074, NASA Langley Research Center, 1991.
- [TADROS *et al.* 03] Y. TADROS, J. RANNEBERG & U. SCHÄFER, « Ring Shaped Motor-Integrated Electric Drive for Hybrid Electric Vehicles », in *EPE*, 2003.
- [TAN 07] S. X.-D. TAN, *Advanced Model Order Reduction Techniques in VLSI Design*, Cambridge University Press, 2007.
- [TARDIEU *et al.* 83] H. TARDIEU, A. ROCHFELD & R. COLLETTI, *La méthode Merise - Tome 1 Principes et outils*, Editions d'organisation (Paris), 1983.
- [TOO 10] J.-L. F. S. TOO, *Caractérisation et Modélisation de composants IGBT et diode PiN dans leur environnement thermique sévère lié aux applications aéronautiques*, Thèse de doctorat, Ecole doctorale de Toulouse, 2010.
- [TOUYA 08] T. TOUYA, *Méthodes d'optimisation pour l'espace et l'environnement*, Thèse de doctorat, Université Toulouse III, 2008.

- [TURKI 08] S. TURKI, *Ingénierie système guidée par les modèles : Application du standard IEEE 15288, de l'architecture MDA et du langage SysML à la conception des systèmes mécatroniques*, Thèse de doctorat, L'Université du Sud Toulon-Var, 2008.
- [VALLON 03] J. VALLON, *Introduction à l'étude de la fiabilité des cellules de commutation à IGBT sous fortes contraintes.*, Thèse de doctorat, ENSEEIHT, 2003.
- [WOOD *et al.* 08] S. K. WOOD, D. H. AKEHURST, O. UZENKOV, W. G. J. HOWELLS & K. D. McDONALD-MAIER, « A Model-Driven Development Approach to Mapping UML State Diagrams to Synthesizable VHDL », *IEEE TRANSACTIONS ON COMPUTERS*, vol. 57, 1357–1371, 2008.
- [ZHANG *et al.* 10] H. ZHANG, H. WANG, D. CHEN & G. ZACHAREWICZ, « A model-driven approach to multidisciplinary collaborative simulation for virtual product development », *Advanced Engineering Informatics*, vol. 24, n° 2, 167 –179, 2010.