

Formalizing and qualifying models for constraint-based embodiment design

Yoann Vernat

▶ **To cite this version:**

Yoann Vernat. Formalizing and qualifying models for constraint-based embodiment design. Engineering Sciences [physics]. Arts et Métiers ParisTech, 2004. English. NNT : 2004ENAM0027 . pastel-00002003

HAL Id: pastel-00002003
https://pastel.hal.science/pastel-00002003

Submitted on 1 Dec 2006

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.

N° d'ordre : 2004-27 ÉCOLE DOCTORALE 432

École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers
Centre de Bordeaux

THÈSE

PRESENTÉE POUR OBTENIR LE GRADE DE

DOCTEUR

DE

L'ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE

D'ARTS ET MÉTIERS

ÉCOLE DOCTORALE

Mécanique des Métiers de l'ingénieur

Spécialité : MÉCANIQUE

par

Yoann VERNAT

FORMALISATION ET QUALIFICATION DE MODÈLES PAR CONTRAINTES EN CONCEPTION PRÉLIMINAIRE

Soutenue le 18 novembre 2004 devant le jury d'examen :

MM.	D. COUTELLIER	Professeur à l'ENSIAME Valenciennes	Président
	M. ALDANONDO	Professeur à l'école des Mines d'Albi	Rapporteur
	J.-B. SAULNIER	Professeur à l'ENSMA Poitiers	Rapporteur
	J.-P. NADEAU	Professeur à l'ENSAM Bordeaux	Directeur de thèse
	P. SEBASTIAN	Maître de conférences, HDR, à l'Université Bordeaux I	Co-directeur de thèse
	L. ZIMMER	Ingénieur de recherche, DASSAULT AVIATION	
	X. FISCHER	Ingénieur chercheur à l'ESTIA Bidart	

L'ENSAM est un Grand Établissement dépendant du ministère de l'Éducation Nationale, composé de huit centres :
Aix-en-Provence, Angers, Bordeaux, Châlons en Champagne, Cluny, Lille, Metz, Paris.

À mes parents,
Aux Coudert,
et à Anne, évidemment

"All models are wrong. Some are useful."
George E. P. Box, *Robustness in the Strategy of Scientific Model Building,* 1979

« Ce qui est simple est toujours faux. Ce qui ne l'est pas est inutilisable. »
Paul Valéry, *Mauvaises pensées et autres*, 1942

Ma thèse a été effectuée à la fois au sein du laboratoire TREFLE site ENSAM (UMR CNRS 8508) et au laboratoire LIPSI de l'ESTIA. La page des remerciements sera donc un peu longuette.

Ce travail a été réalisé et financé dans le cadre du projet RNTL CO2. Je commencerai donc par remercier les différents intervenants du projet pour le travail accompli et l'ambiance agréable des revues de projet, notamment Laurent ZIMMER d'avoir participé à mon jury de thèse.

Je tiens à remercier les Professeurs Michel ALDANONDO et Jean-Bernard SAULNIER d'avoir accepté d'examiner ce travail, ainsi qu'au Professeur Daniel COUTELLIER d'avoir accepté de présider mon jury de thèse.

J'adresse toute ma reconnaissance au Professeur Jean-Pierre NADEAU qui a beaucoup compté au cours des quatre dernières années, puisqu'il m'a donné l'envie de faire cette thèse, accordé sa confiance et prodigué son aide tant sur le plan humain, que scientifique ou professionnel. Il a su vaincre mes doutes, m'a communiqué sa curiosité, et j'espère avoir absorbé une partie de sa culture scientifique. Merci au « Grand Gourou ».

Je tiens à souligner l'estime que je porte à Patrick SEBASTIAN pour son soutien et son encadrement scientifique qui m'ont été bénéfiques pour mener à bien ces travaux, tout comme sa sympathie et sa disponibilité. Merci au « grand Gourou ».

Je remercie Xavier FISCHER pour m'avoir « ouvert la voie » sur les CSP au travers de ses travaux, pour l'envie qu'il m'a inspirée de réaliser cette thèse dans le pays basque et d'avoir été présent lorsque j'étais à l'ESTIA. Merci au troisième Gourou.

Je tiens également à remercier les membres du Groupe Énergétique et Systèmes de conception pour les discussions scientifiques fructueuses, l'aide procurée et les encouragements ; je pense à Jérôme PAILHES, Waste AREGBA, Denis BRUNEAU, Amar BOUCHAMA, Dominique SCARAVETTI, Raphaëlle DORE ; aux doctorants Abdelaziz ARBAOUI, Vanessa HO KON TIAT, Raphaël CHENOUARD, Thomas MORILLON, bon courage pour la suite.

Ces trois années passées se sont déroulées aux côtés d'autres thésards, collègues et néanmoins amis. À l'ESTIA, merci à Raf et Ludo d'avoir su imposer cette dynamique de groupe autour de la machine à café en particulier, mais surtout pour le soutien mutuel lors des coups de mous. Merci sincèrement pour ces trois années. Merci également à Jean, Atano, Jérémy et les autres. Merci à Haritza pour les cours de basque ; à Thomas, Pascal, Patrick pour le logistic support et le jorky. Au TREFLE, aux reclus du labo, Céline, Lotar et Xavier merci pour m'avoir accueilli plus ou moins temporairement dans vos locaux, merci également à tous les autres, dont la liste ne sera pas donnée car nécessairement non exhaustive.

Je tiens enfin à mentionner le plaisir que j'ai eu à travailler au sein du TREFLE et j'en remercie ici tous les membres, en particulier le Professeur Jean-Rodolphe PUIGGALI, directeur du laboratoire. De la même manière, je tiens à remercier le directeur de l'ESTIA Jean-Roch GUIRESSE et Pascal WEIL, directeur du LIPSI, ainsi que l'ensemble du personnel de l'ESTIA pour l'accueil et la disponibilité qui m'ont été accordés pendant ces trois ans.

Et enfin, merci à Anne de m'avoir supporté pendant trois ans, même si c'était page 24.

Table des matières

Chapitre 1
CONTEXTE GÉNÉRAL **1**

1 - I **ENJEUX DES PHASES PRÉLIMINAIRES DE LA CONCEPTION** **2**
1 - II **POSITIONNEMENT DE NOTRE TRAVAIL** **3**
1 - III **INTÉGRATION DU CALCUL EN CONCEPTION** **5**
1 - III.1 Conception intégrée 5
1 - III.2 Travaux d'intégration du calcul en conception 5
1 - III.3 Spécificités liées à la conception préliminaire 6
1 - III.4 Techniques de modélisation partiellement adaptées à la conception préliminaire 7
1 - III.4.1 Modèles qualitatifs 7
1 - III.4.2 Modèles d'approximation 8
1 - IV **OUTILS D'AIDE À LA DÉCISION EN CONCEPTION PRÉLIMINAIRE** **9**
1 - IV.1 Problèmes de satisfaction de contraintes 9
1 - IV.1.1 Définitions 9
1 - IV.1.2 Constraint Explorer 10
1 - IV.1.3 Intérêts pour la conception 10
1 - IV.2 Limitations liées à la résolution des Problèmes de Satisfaction de Contraintes 11
1 - V **CONCLUSION** **12**

Chapitre 2
DÉMARCHE de FORMALISATION de MODÈLES en CONCEPTION PRÉLIMINAIRE **13**

2 - I **INTRODUCTION** **14**
2 - II **MODÉLISATION** **14**
2 - II.1 Qu'est-ce qu'un modèle ? 14
2 - II.2 Les étapes de la formalisation d'un modèle 17
2 - II.2.1 Hypothèses 17
2 - II.2.2 Réalisation 18
2 - II.2.3 Qualification 19
2 - II.3 Conclusion 22
2 - III **MODÉLISATION EN CONCEPTION PRÉLIMINAIRE** **23**
2 - III.1 Analyse du besoin 23
2 - III.1.1 Propriétés des modèles en conception en fonction de leur utilisation 23
2 - III.1.2 Conséquences en terme de modélisation 24
2 - III.1.3 Critères de qualification de la conception en aide à la décision 25
2 - III.2 Modélisation en conception préliminaire 26
2 - III.2.1 Variables des modèles de conception 27
2 - III.2.2 Modèles de description physique en conception 30
2 - IV **ANALYSE D'UN PROBLÈME DE MODÉLISATION EN CONCEPTION** **33**
2 - IV.1 Analyse du problème de conception 33
2 - IV.2 Organigramme technique (OT) 33
2 - IV.2.1 Description 33
2 - IV.2.2 Intérêt pour la modélisation 34
2 - IV.2.3 Éléments standard, éléments non-définis 35
2 - IV.3 Critique de l'organigramme technique 36
2 - IV.3.1 Milieux extérieurs 36
2 - IV.3.2 Conclusion 37
2 - IV.4 Blocs diagrammes fonctionnels (BDF) 38
2 - IV.4.1 Description 38
2 - IV.4.2 Intérêt pour la modélisation 39
2 - IV.5 Critique des BDF : extension aux graphes d'association substances-champs 40

2 - IV.6 Synthèse de l'approche méthodologique 42
2 - IV.6.1 Récapitulation des différents types de modèles et variables associées 42
2 - IV.6.2 Récapitulation des différents outils d'analyse utilisés 43
2 - V FORMALISATION DES MODÈLES DE COMPOSANTS ET DES MODÈLES D'INTERACTIONS (PHASE DE MODÉLISATION) 44
2 - V.1 Formalisation des modèles de composants 44
2 - V.1.1 Hypothèses 44
2 - V.1.2 Réalisation 47
2 - V.1.3 Qualification 47
2 - V.2 Formalisation des modèles d'interaction 48
2 - VI VALIDATION DU MODÈLE GLOBAL : COHÉRENCE, QUALIFICATION 50
2 - VI.1 Validation du modèle global 50
2 - VI.1.1 Cohérence intrinsèque 50
2 - VI.1.2 Validation pour le traitement des modèles 53
2 - VI.1.3 Qualification du modèle global 54
2 - VI.2 Démarche d'adaptation 56
2 - VI.2.1 Analyse 57
2 - VI.2.2 Hiérarchisation et biais d'attaque 57
2 - VI.2.3 Techniques d'adaptation 58
2 - VII CONCLUSION 61

Chapitre 3
FORMALISATION d'un MODÈLE de BATTERIE de VÉHICULE ÉLECTRIQUE 63

3 - I CONTEXTE 64
3 - II FORMALISATION D'UN MODÈLE 65
3 - II.1 Phase d'analyse du besoin 65
3 - II.2 Analyse au niveau 1 69
3 - II.2.1 Principe de solution 69
3 - II.2.2 Analyse des flux au niveau 1 69
3 - II.2.3 Qualification de la conception 71
3 - II.2.4 Bilan de l'analyse des flux au niveau 1 72
3 - II.2.5 Modèles de composants 73
3 - II.2.6 Modèles de comportement : milieux extérieurs 75
3 - II.2.7 Modèles d'interaction 78
3 - II.2.8 Concaténation des modèles de niveau 1 81
3 - II.3 Flux d'énergie thermique (FET) 82
3 - II.3.1 Descente au modèle de niveau 2 82
3 - II.3.2 Descente au modèle de niveau 3 86
3 - II.3.3 Descente aux modèles de niveau 4 89
3 - II.3.4 Descente aux modèles de niveau 5 93
3 - II.3.5 Adaptation du modèle de niveau 5 95
3 - II.3.6 Formalisation d'un modèle de composant pour le faisceau (niveau 3) 97
3 - II.3.7 Modèle de composant du bloc de batterie (flux d'énergie thermique, niveau 1) 99
3 - II.4 Flux d'énergie mécanique (air) (FEMA) 102
3 - II.4.1 Niveau 1 102
3 - II.4.2 Système de ventilation (Niveau 2) 103
3 - II.4.3 Bloc électrique de la batterie (Niveau 2) 106
3 - II.5 Flux d'énergie mécanique, due au bruit (FEMB) 108
3 - II.5.1 Modèles de composant 108
3 - II.5.2 Modèle d'interaction 109
3 - II.6 Flux de matière (poussières) (FM) 110
3 - II.6.1 Modèle empirique de déposition de particules 110
3 - II.6.2 Analyse 112
3 - II.6.3 Modèles de composant 112
3 - II.6.4 Modèle d'interaction du flux de matière 113
3 - II.7 Flux d'énergie électrique (FEE) 116

3 - II.7.1 Ventilateur 116
3 - II.7.2 Bloc électrique 116
3 - III BILAN DE LA DÉMARCHE 121
3 - III.1 Modèle global 121
3 - III.2 Validation du modèle global obtenu 121
3 - III.2.1 Complétude et cohérence du modèle global 121
3 - III.2.2 Qualification du modèle global 122
3 - IV CONCLUSION 122

Chapitre 4
QUALIFICATION de MODÈLES : PARCIMONIE, EXACTITUDE, PRÉCISION, SPÉCIALISATION 125

4 - I VÉRIFICATION ET VALIDATION DE MODÈLES (V&V) 126
4 - II PARCIMONIE 128
4 - II.1 De la complexité à la parcimonie 128
4 - II.2 Procédure d'estimation de la parcimonie 130
4 - II.3 Analyse 130
4 - III EXACTITUDE ET PRÉCISION 132
4 - III.1 Pourquoi les distinguer ? 132
4 - III.2 Exactitude 133
4 - III.2.1 Notre définition 133
4 - III.2.2 Espace des solutions du modèle à qualifier 133
4 - III.2.3 Référence 136
4 - III.2.4 Mesure de la distance 137
4 - III.2.5 Exactitude d'un modèle imprécis 138
4 - III.2.6 Procédure de qualification de l'exactitude 140
4 - III.2.7 Critique 140
4 - III.3 Précision 141
4 - III.3.1 Précision, incertitude, imprécision : définitions 141
4 - III.3.2 Conception en contexte imprécis 142
4 - III.3.3 Sources d'imprécisions du modèle 143
4 - III.3.4 Estimation de la précision intrinsèque du modèle 144
4 - III.3.5 Procédure de qualification de la précision 145
4 - III.3.6 Critique 145
4 - IV SPÉCIALISATION 146
4 - V LIENS ENTRE LES QUATRE PARAMÈTRES 147
4 - V.1 Exploitation d'un modèle 147
4 - V.2 Domaine d'évolution du PEPS, intrinsèque au problème 148
4 - V.3 Lien entre le domaine d'exploitation et le domaine intrinsèque 150
4 - VI CONCLUSION 151
4 - VI.1 Estimation du PEPS d'un modèle 151
4 - VI.2 Adaptation d'un modèle 151

Chapitre 5
QUALIFICATION de MODÈLES ADAPTÉS de la BATTERIE 153

5 - I PRÉSENTATION DES MODÈLES 154
5 - I.1 Description du modèle adapté du niveau 5 155
5 - I.2 Description du modèle adapté du niveau 2 155
5 - I.3 Description du modèle de référence (MR) 155
5 - I.3.1 Équilibre aéraulique 157
5 - I.3.2 Équilibre thermique 157
5 - II VALIDATION POUR LE TRAITEMENT DES MODÈLES ADAPTÉS 158
5 - III QUALIFICATION DES MODÈLES : ESTIMATION DU PEPS 158
5 - III.1 Parcimonie 158

5 - III.2 Spécialisation 159
5 - III.3 Précision 159
5 - III.4 Exactitude 160
5 - III.4.1 Stratégie de qualification : choix des variables et des points de comparaison 160
5 - III.4.2 Qualification de l'exactitude 164
5 - III.4.3 Discussion à propos du choix des variables d'entrée 167
5 - IV ADAPTATION DU MODÈLE DE NIVEAU 2 170
5 - IV.1 Présentation du modèle adapté 170
5 - IV.2 Parcimonie 171
5 - IV.3 Spécialisation 171
5 - IV.4 Exactitude et Précision 171
5 - IV.4.1 Stratégie de qualification de l'exactitude et de la précision 171
5 - IV.4.2 Sources d'imprécisions 172
5 - IV.4.3 Qualification de l'exactitude et de la précision 172
5 - V CONCLUSION 175

Chapitre 6
CONCLUSIONS et PERSPECTIVES 177

6 - I CONTRIBUTIONS DE LA MÉTHODOLOGIE PROPOSÉE 178
6 - I.1 Formalisation de modèle en conception préliminaire 178
6 - I.2 Démarche de qualification des modèles 178
6 - I.3 Capitalisation des connaissances 179
6 - I.4 Application, valorisation des travaux de recherche 179
6 - I.5 Conception par contraintes 179
6 - II PERSPECTIVES DE RECHERCHE 180
6 - II.1 Formalisation de modèles pour la conception préliminaire 180
6 - II.2 Qualification des modèles 180
6 - II.3 Qualification de modèles et aide à la décision en conception préliminaire 181

NOMENCLATURE 183

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES 187

ANNEXES

ANNEXE 1 A1 - 1
ANNEXE 2 A2 - 1
ANNEXE 3 A3 - 1
ANNEXE 4 A4 - 1

CHAPITRE 1

CONTEXTE GÉNÉRAL

1 - I ENJEUX DES PHASES PRÉLIMINAIRES DE LA CONCEPTION

L'enjeu économique du développement de produits industriels nécessite la prise en compte du processus de la conception dans sa globalité [Berliner et Brimson, 1988], c'est-à-dire sur l'ensemble du cycle de vie, depuis les premières réflexions sur le besoin du client en passant par la sortie du produit de la chaîne de production, jusqu'à la fin de vie du produit (destruction, recyclage, réutilisation).

Si des recherches ont été entreprises [Gautier et Giard, 2000] afin de maîtriser les coûts de développement de produits, la communauté de recherche en conception s'intéresse également à rationaliser et améliorer le processus de développement de produit afin de répondre au mieux aux exigences simultanées de qualité, de délai et de coût qui y sont liées.

On peut préciser cette réflexion en s'appuyant sur la figure 1-1. En particulier, on s'aperçoit que les phases préliminaires de la conception (phase d'étude et phase de conception) ne représentent qu'une faible part des coûts réels de la création de produit (courbe en pointillés) alors qu'elles conditionnent largement – à hauteur de 70% – le coût global final du développement.

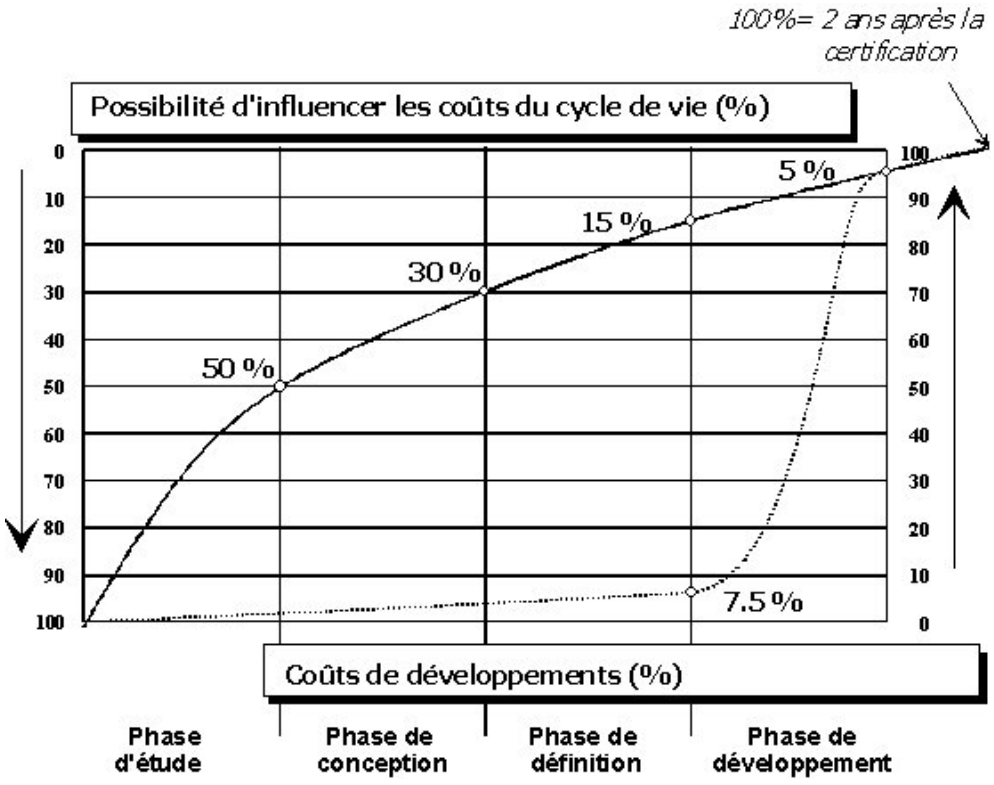


Figure 1-1 : Influence stratégique de la conception préliminaire dans le cycle de développement du produit [Zablit et Zimmer, 2001]

Ainsi, les étapes de conception préliminaire présentent des intérêts économique et stratégique majeurs dans le cycle de développement d'un produit industriel. L'enjeu de ces étapes est donc d'orienter le plus tôt possible la conception vers les meilleurs concepts de solution en termes de coût et de qualité.

1 - II POSITIONNEMENT DE NOTRE TRAVAIL

On peut définir l'activité de conception de plusieurs manières et de nombreux auteurs ont proposé leur propre définition. Il semble difficile de définir l'activité de conception en ingénierie sans être restrictif, tant elle est complexe et tant elle peut recouvrir des champs divers. C'est pourquoi, nous prenons le parti de présenter une vision de l'activité de conception au travers de notre positionnement par rapport à des travaux existants.

Pahl et Beitz proposent une décomposition séquentielle systématique du processus de conception (figure 1-2) [Pahl et Beitz, 1996]. Cette description s'appuie sur les directives VDI de la Société des Ingénieurs Allemands. Elle présente l'avantage d'être exhaustive et explicite dans le détail des tâches de conception qui interviennent. Pahl et Beitz (P&B) distinguent les quatre tâches suivantes :

Analyse et structuration du besoin (*Product planning and clarifying the task*)

Cette phase consiste à faire l'analyse du besoin du marché. Elle aboutit à la description de l'ensemble des spécifications (techniques ou non) du besoin que doit satisfaire le produit vis-à-vis du client final, sous la forme d'un cahier des charges.

Recherche de concepts (*Conceptual design*)

Durant cette étape s'effectue la recherche d'une structure fonctionnelle pour le système à concevoir. Différentes pistes de solutions sont explorées et évaluées pour matérialiser les besoins identifiés à l'étape précédente. Le résultat de cette phase de recherche de concepts est la définition d'un ou plusieurs principes de solution (*solution principle*).

Conception architecturale (*Embodiment design*)

Chacun des concepts envisagés à l'issue de la phase précédente sont développés et évalués. Les choix structuraux, les choix de composants, ainsi que leur dimensionnement (formes, matériaux) sont réalisés. À l'issue de cette phase, l'architecture la plus satisfaisante est choisie parmi celles étudiées (*definitive layout*), sur la base de critères techniques et économiques, elle fait l'objet ensuite de la conception de détail.

On trouve, pour désigner cette phase de conception, le terme de conception architecturale [Sébastian, 2003] qui est plus utilisé en génie des procédés. Nous utiliserons pour notre part le terme de conception préliminaire dans le reste du document, qui recouvre généralement à la fois la phase de recherche de concepts (*conceptual design)* et de conception architecturale (*embodiment design)*.

Conception détaillée (*Detail design*)

Chaque élément de l'architecture sélectionnée est défini complètement et validé. Les plans, la nomenclature ainsi que les procédés de fabrication et de contrôle sont déterminés. À la suite de cette phase, qui constitue la dernière étape du processus de conception, le produit est entièrement défini.

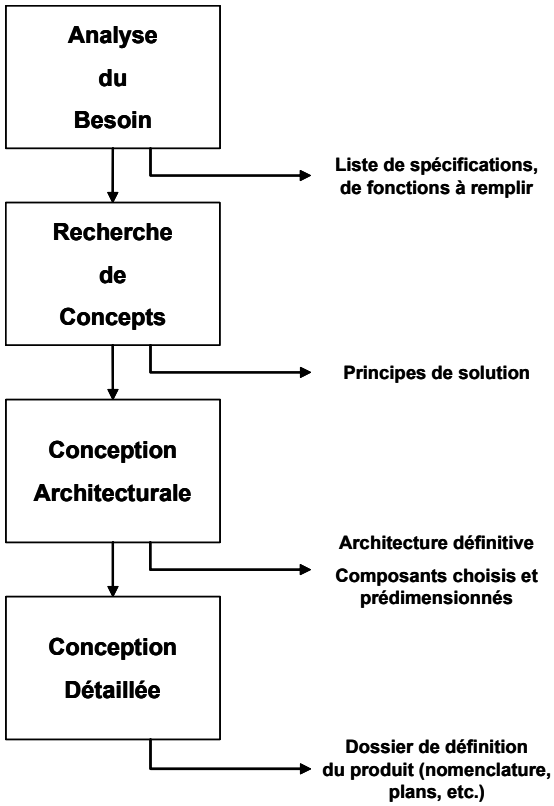


Figure 1-2 : Modèle simplifié du processus de conception proposé par [Pahl et Beitz, 1996]

L'objectif étant de positionner nos travaux dans le processus global de conception, nous ne discutons pas du modèle de P&B. Nous ne présentons que ce modèle du déroulement de la conception, malgré l'existence de nombreux autres travaux (*e.g.* [Chandrasekaran, 1990]). Scaravetti propose par ailleurs une revue récente et exhaustive des démarches et des modèles de processus de conception [Scaravetti, 2004].

La démarche de Pahl et Beitz est parfois critiquée, mais reste largement admise et partagée. Elle a en outre le mérite de faire intervenir toutes les tâches – qu'elles soient successives, juxtaposées ou superposées – nécessaires à l'aboutissement du développement d'un produit.

Les recherches autour de l'activité de conception concourent toutes à l'amélioration du processus de conception. On peut cependant distinguer deux types d'approches de recherche :

- certains travaux visent à l'amélioration du processus global de développement,
- d'autres se penchent sur des problèmes plus précis associés à des tâches particulières du processus global, en adoptant un point de vue métier, méthodologique, basé sur les outils ou les fonctions.

Nous visons pour notre part à améliorer les choix de conception effectués dans les phases préliminaires de la conception par l'intermédiaire du calcul. Nous entendons par calcul, l'activité qui consiste à évaluer et prédire les performances liées au comportement physique d'un concept de solution par l'intermédiaire d'un modèle mathématique. Une des voies de recherche en conception est notamment d'améliorer la prise en compte de la fonction calcul au cours de la conception dans une démarche de conception intégrée.

1 - III INTÉGRATION DU CALCUL EN CONCEPTION

1 - III.1 Conception intégrée

La critique principale à l'encontre de la démarche proposée par Pahl et Beitz (P&B) est son aspect séquentiel et le fait que les différentes activités du processus de conception sont cloisonnées. Par exemple, des choix de conception réalisés dans les premières phases et non adaptés à la fabrication du produit ne sont remis en cause que tardivement, au cours de la phase de conception détaillée. Le processus de P&B est essentiellement séquentiel et itératif, ce qui est pénalisant en terme de délais de développement. Différentes approches ont été imaginées en vue d'améliorer cette démarche. Il existe principalement deux approches :

- l'**ingénierie concourante** (*concurrent engineering*) [Sohlenius, 1992], dont l'objectif est une meilleure prise en compte des contraintes de chaque métier tout au long du développement du produit, et qui doit se traduire par une coordination des différentes équipes autour d'un objectif commun,
- l'**ingénierie simultanée** [Bocquet, 1998], qui vise principalement à réduire les délais de mise sur le marché des produits en parallélisant chacune des tâches de la conception qui doivent être engagées simultanément.

Chacune de ces deux notions est mise en œuvre dans la communauté de recherche française en conception au travers de la **conception intégrée** [Tollenaere, 1998]. Le but est d'arriver à une meilleure collaboration et coordination des équipes intervenant tout au long de la conception par la mise en commun de l'ensemble des connaissances des métiers de la conception. Elle favorise également le recouvrement des différentes activités de la conception.

Fischer montre que la conception intégrée inclut deux types d'approches [Fischer, 2000] :

- l'**intégration des outils**, pour améliorer la communication entre les outils utilisés par les différents protagonistes de la conception,
- l'**intégration des fonctions**, qui vise à un partage des cultures des différents métiers pour limiter les erreurs dues à des contradictions dans les choix techniques.

1 - III.2 Travaux d'intégration du calcul en conception

Troussier [Troussier, 1999] met en évidence le fait qu'il existe différentes approches de l'intégration du calcul en conception, puisqu'elle distingue trois moyens d'y parvenir :

- faire concevoir par un spécialiste du calcul,
- faire calculer un concepteur,
- coordonner les activités du concepteur et du spécialiste du calcul.

Ces trois approches se concrétisent par différents travaux qui visent : soit à automatiser le passage d'un modèle du produit (généralement purement géométrique) à un modèle de calcul par éléments finis comme par exemple [Shephard et al., 1990], soit à guider la modélisation réalisée par un non spécialiste [Troussier et al., 1999].

Ben Amara [Ben Amara, 1998] souligne le fait que les calculs d'évaluation des performances du produit interviennent à différentes étapes du processus de conception et sous des formes variées (calcul cinématique, calcul statique, dynamique, RDM, éléments finis, règles expertes, etc.). Cependant, on s'aperçoit, lorsqu'on étudie les travaux d'intégration du calcul en conception, que l'essentiel des travaux s'est porté de manière spécifique sur l'intégration du calcul de validation. Le calcul de validation consiste à évaluer les performances d'un système au travers d'un modèle de calcul dont les caractéristiques ont été choisies a priori. Les choix sont validés par le calcul. Cela signifie donc que les choix de conception sont réalisés avant d'effectuer le calcul et qu'ils ne peuvent être remis en cause qu'une fois le calcul réalisé.

Le calcul de validation intervient donc principalement dans la phase de conception détaillée où le produit est déjà bien défini en terme d'architecture, de géométrie ou de matériaux (démarche d'analyse). Il ne convient pas pour la phase de conception préliminaire. Une approche plus adaptée à la conception est la démarche de synthèse, qui consiste à déterminer directement par le calcul, des choix de conception cohérents avec les objectifs, et non pas à valider des choix a posteriori (*cf.* figure 1-3).

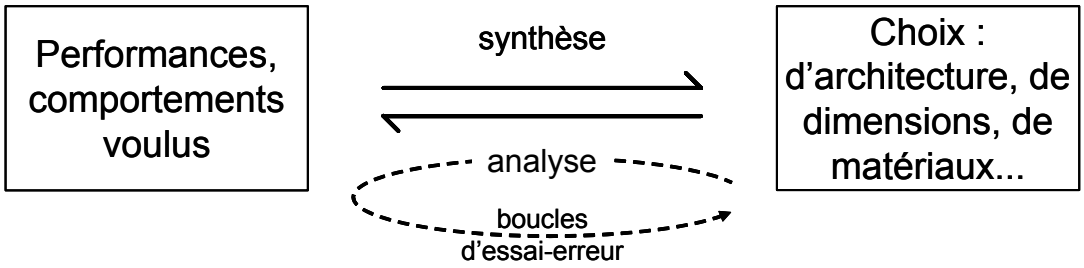


Figure 1-3 : Démarche d'analyse vs démarche de synthèse

Bien que la problématique générale de l'utilisation de modèles de calcul dans les phases préliminaires de la conception soit abordée dans certains travaux [Hamdi et al., 2003, Coatanéa et al., 2003], force est de constater qu'il subsiste un manque de recherche sur les modèles en conception préliminaire [Yannou, 2001].

1 - III.3 Spécificités liées à la conception préliminaire

La conception préliminaire s'avère être une étape complexe pour plusieurs raisons :

- à ce stade de la conception, les décisions sont prises dans un contexte où peu de choses sont définies et où les données du problème sont encore mal connues,
- l'espace de recherche de solutions doit rester assez général pour ne pas écarter de solutions potentielles,
- une alternative de conception peut faire appel à des choix d'éléments parmi des ensembles discrets (*e.g.* choix d'une pompe) ou pour des grandeurs à valeurs dans des domaines continus (*e.g.* longueur d'un tube),
- elle est nécessairement pluridisciplinaire : la prise en compte de l'ensemble des contraintes des différents métiers (fabrication, marketing, etc.) est indispensable pour éviter les remises en cause tardives et coûteuses,

- enfin, les choix doivent être optimaux par rapport à plusieurs critères parfois difficilement comparables.

Il n'est donc pas adapté de s'appuyer sur des modèles classiques de validation pour prendre une décision en conception préliminaire. En revanche, il existe différentes approches de modélisation qui constituent des pistes intéressantes de solution pour l'intégration du calcul en conception.

1 - III.4 Techniques de modélisation partiellement adaptées à la conception préliminaire

1 - III.4.1 Modèles qualitatifs

Les recherches sur le raisonnement qualitatif [Travé-Massuyès et al., 1997] ont permis l'émergence de techniques de modélisation en contexte imprécis. Dans ce cadre, les variables des modèles ne sont plus des valeurs réelles mais un espace des quantités plus ou moins précis : dans l'algèbre des signes, une variable est positive, négative ou nulle, le raisonnement sur les ordres de grandeurs permet de considérer des grandeurs parmi les valeurs suivantes {NG,NM,NP,0,PP,PM,PG}[1] et l'arithmétique des intervalles [Jaulin et al., 2001] permet de manipuler des variables définies comme des intervalles. Cela permet de simuler le comportement de système mal définis.

Ainsi, Joskowicz et Sacks mettent en évidence l'intérêt de la simulation cinématique qualitative du comportement de mécanismes pour l'aide à la conception [Joskowicz et Sacks, 1993]. On trouve également des exemples de calculs par éléments finis en contexte imprécis, s'appuyant sur la représentation par les intervalles [Dessombz et al., 2003]. Dans ce cas, il est montré qu'il est possible de caractériser l'ensemble des comportements d'un même système lorsque certains paramètres du système, comme le module d'Young ou l'épaisseur d'une plaque, prennent leurs valeurs dans un intervalle.

Les modèles qualitatifs, s'ils permettent de prévoir le comportement du système alors que le problème est mal défini, s'inscrivent également dans une démarche d'analyse et de validation : les éléments (géométrie, matériaux, etc.) que l'on cherche à déterminer pour la conception préliminaire sont définis au préalable pour écrire le modèle [Yannou, 2001]. En outre, l'avantage du formalisme qualitatif est de permettre une plus grande abstraction dans la description du comportement d'un système. Cependant, il peut également s'avérer être un inconvénient, dans la mesure où les solutions de tels modèles conduisent parfois à des indéterminations ou à des comportements aberrants.

[1] NG, NM, NP : négatif grand, négatif moyen, négatif petit
PG, PM, PP : positif grand, positif moyen, positif petit

1 - III.4.2 Modèles d'approximation

L'utilisation de modèles d'approximation peut constituer une voie intéressante de l'intégration du calcul en conception. La méthode consiste à développer un modèle de simulation d'un système – souvent un modèle numérique –, puis à construire une approximation mathématique de ce modèle à l'aide de fonctions d'approximation (polynômes, splines, réseaux de neurones, etc.) [Barton, 1998]. Barthelemy et Haftka présentent ainsi une revue des travaux liés au concept d'approximation de modèles [Barthelemy et Haftka, 1993]. L'approximation peut être réalisée sur un domaine restreint du modèle (approximation locale) ou sur l'ensemble du modèle (approximation globale). Lorsque l'approximation recouvre l'ensemble du domaine d'application du modèle initial, le modèle est appelé métamodèle (on trouve parfois *surrogate model)* [Meckesheimer, 2001]. L'intérêt de cette approche est que le modèle approché est généralement explicite en fonction des variables que l'on cherche à dimensionner. Il est par conséquent plus simple à évaluer, et permet généralement une exploration plus rapide et exhaustive de l'espace de recherche des solutions qu'une recherche effectuée avec le modèle de simulation. Ce type d'approche est utilisé dans le cadre de l'optimisation et s'est généralisé, au point de conduire à la réalisation de démarches de construction de métamodèles [Kleijnen et Sargent, 2000] ou d'études visant à proposer des guides de choix des fonctions d'approximation selon les cas [Jin et al., 2001].

On peut néanmoins faire les reproches suivants à l'utilisation des modèles d'approximation en conception préliminaire :

- cette approche, bien qu'intéressante, est relativement longue à mettre en œuvre, puisqu'elle suppose la création d'un modèle de simulation, puis d'un modèle d'approximation qui demande généralement d'opérer une optimisation sur les paramètres à ajuster, afin de s'assurer de la qualité du modèle approché,
- en outre, le niveau de détail du modèle de simulation qui sert de base à l'approximation est souvent trop important pour la conception préliminaire,
- enfin, une modification du cahier des charges peut obliger à reconsidérer le modèle de simulation et à refaire une approximation.

Certains outils d'aide à la décision permettent d'inscrire l'activité de calcul en conception préliminaire tôt dans le processus de conception.

1 - IV OUTILS D'AIDE À LA DÉCISION EN CONCEPTION PRÉLIMINAIRE

L'un des objectifs de l'intelligence artificielle (IA) est d'étudier des outils permettant de reproduire les raisonnements humains. Parmi les outils d'aide à la conception issus de l'IA, nous avons retenu les outils basés sur le raisonnement par contraintes et plus particulièrement les problèmes de satisfaction de contraintes.

1 - IV.1 Problèmes de satisfaction de contraintes

1 - IV.1.1 Définitions

Un Problème de Satisfaction de Contraintes (PSC)[2] peut être défini comme un triplet $(\boldsymbol{V}, \boldsymbol{D}, \boldsymbol{C})$:

- $\boldsymbol{V}$ est un ensemble de n **variables** $\{V_1, V_2, \ldots, V_n\}$,
- $\boldsymbol{D}$ est un ensemble de n **domaines** initiaux de valeurs pour chaque variable :
  $\{D_1, D_2, \ldots, D_n\}$, où $V_1 \in D_1, V_2 \in D_2, \ldots, V_n \in D_n$.
- $\boldsymbol{C}$ est un ensemble de p relations appelées **contraintes** $\{C_1, C_2, \ldots, C_p\}$.

Une solution est un n-uplet de valeurs $(a_1, a_2, \ldots, a_n)$ où chaque valeur $a_i \in D_i$ et respecte simultanément toutes les contraintes de $\boldsymbol{C}$. Le but de la résolution d'un tel problème est généralement de trouver toutes les solutions. Dans le cas où certaines variables sont à valeurs continues, dans ce cas, la résolution consiste à trouver la restriction des domaines de valeurs respectant les contraintes.

Une **contrainte** est une relation explicite entre plusieurs variables. Cette relation impose des restrictions sur les domaines de valeurs possibles pour les variables du problème. Plus précisément, elle peut être une combinaison logique de plusieurs contraintes élémentaires, parmi les suivantes :

- **les contraintes extensives** : la relation d'une contrainte en extension décrit une liste explicite et exhaustive des combinaisons possibles – ou au contraire impossibles – de valeurs (m-uplets) entre les m variables en jeu dans la contrainte.
- **les contraintes intensives** : la relation d'une contrainte en intension, est une équation ou une inéquation explicite reliant les variables entre elles (égalité, inégalité), elle fait intervenir des fonctions analytiques et des fonctions transcendantes.
- **les contraintes logiques** : implication et déclencheur logiques de contraintes (SI ... ALORS), conjonction de contraintes (ET logique), disjonction de contraintes (OU logique) permettent d'obtenir des combinaisons de contraintes.

La résolution d'un PSC s'effectue généralement à l'aide d'un **moteur d'inférence P.S.C. ou solveur P.S.C. :** « Composante essentielle d'un système expert, constituée d'un programme qui utilise des méthodes de raisonnement pour faire des déductions logiques et tirer des conclusions de la base de connaissances, dans le but de proposer des solutions au problème posé » [OQLF, 2004].

[2] en anglais, Constraint Satisfaction Problem (C.S.P.).

Le solveur traite conjointement l'ensemble des contraintes, des variables et des domaines qui définissent la base de connaissances. Dans notre cas, les conclusions tirées par le solveur à partir des contraintes sont des restrictions sur les domaines de valeur des variables.

1 - IV.1.2 Constraint Explorer

L'outil utilisé dans ce travail est un outil de résolution de problèmes de satisfaction de contraintes numériques. Cela signifie qu'il permet le traitement simultané de variables discrètes (nombres entiers, variables symboliques) et de variables continues (variables réelles dont le domaine de valeur est un intervalle).

Le solveur PSC numérique « *Constraint Explorer* » est développé par la société Dassault Aviation [Zablit et Zimmer, 2001]. Nous avons contribué à son amélioration en vue d'en faire un outil d'aide à la décision en conception préliminaire, dans le cadre du projet RNTL CO2[3] [Zimmer, 2001, CO2, 2003]. Constraint Explorer (CE) est basé sur l'arithmétique des intervalles [Jaulin et al., 2001, Benhamou et Older, 1997]. Les algorithmes mathématiques permettant la résolution d'un PSC numérique ont été présentés par Olivier LHOMME [Lhomme, 1993]. Le processus de propagation des contraintes et de restriction des domaines (algorithme de HC3-like) a été exposé par J.G. Cleary [Cleary, 1987, Granvilliers et Monfroy, 2000]. Les solutions produites par le solveur de contraintes CE sont une sur-approximation de l'espace des solutions, ceci signifie que le solveur détermine des sous-domaines pour les valeurs des variables du problème dans lesquelles une solution au problème de conception existe, mais que toutes les valeurs des sous-domaines ne sont pas solutions.

Le résultat fourni par CE est une liste des solutions du problème, c'est-à-dire une combinaison des valeurs possibles pour chaque variable respectant la totalité des contraintes du problème. Lorsqu'une variable est définie sur un intervalle, la valeur de la variable d'une solution est un sous-domaine du domaine initial de la variable dont la taille est conditionnée par la précision de la résolution souhaitée. En revanche, la résolution par CE est complète, au sens où toutes les solutions existantes au problème font partie des restrictions des domaines trouvées.

1 - IV.1.3 Intérêts pour la conception

Notre travail s'attache essentiellement à l'amélioration de la prise en compte du comportement physique d'un système à concevoir dans le processus de conception préliminaire. Les outils de satisfaction de contraintes numériques semblent être des outils adaptés pour les raisons suivantes :

- ils permettent de prendre en compte des contraintes issues de différents champs intervenant en conception : comportement physique du système, règles de fabrication, contraintes économiques ou de maintenance, etc.
- ils traitent conjointement les objectifs de la conception (spécifications) et les modèles,

[3] RNTL : Réseau National des Technologies Logicielles, CO2 : COnception par COntraintes

- les variables traitées sont à la fois continues et discrètes,
- l'aspect déclaratif du problème sous forme de relations simples et exprimées naturellement facilite la modification de la base de connaissances : il est toujours possible d'ajouter ou d'enlever une contrainte,
- les solutions du PSC fournissent des valeurs au concepteur dont il sait qu'elles sont cohérentes avec la base de connaissances,
- enfin, les PSC numériques permettent de traiter des variables définies sur des intervalles, offrant ainsi la possibilité de résoudre un problème de conception préliminaire en contexte imprécis.

On trouve, dans la littérature, des travaux présentant l'intérêt de l'approche par contraintes en conception. Ainsi, Lottaz [Lottaz et al., 2000] montre comment les PSC permettent de gérer les conflits et favorisent la collaboration en mettant en commun les points de vue de différents métiers (architecte, ingénieur, commercial, concepteur, etc.) pour la définition d'une solution de compromis. Fischer a montré que l'utilisation des PSC en conception préliminaire permettait de mettre en œuvre une démarche de Conception Inversée Intégrée [Fischer et al., 2002], puisque le calcul de dimensionnement est mis en œuvre très tôt dans le processus global de conception. Cette démarche de conception se rapproche d'une démarche de synthèse et permet de trouver des solutions innovantes pour une enceinte de déverminage [Fischer, 2000]. Enfin, Bensana [Bensana et al., 2000] montre l'intérêt de l'utilisation des PSC, et plus particulièrement, d'une extension des PSC intégrant la notion d'incertitude, pour un problème de configuration de moteurs d'avion.

1 - IV.2 Limitations liées à la résolution des Problèmes de Satisfaction de Contraintes

Les performances des solveurs PSC sont toutefois limitées par certaines spécificités, qui ont d'importantes conséquences sur la formulation des modèles :

- Spécificités liées aux solveurs de PSC numériques :
  - ils sont limités par le nombre de variables et de contraintes qu'ils peuvent traiter, les problèmes que nous avons traités faisaient intervenir plusieurs centaines de variables et un nombre de contraintes du même ordre de grandeur,
  - on ne peut pas intégrer de modèles dynamiques, au sens où une solution ne peut pas être définie comme une fonction du temps.
- Spécificités liées à la syntaxe des contraintes :
  - les relations entre variables doivent être algébriques, et peuvent faire intervenir des fonctions transcendantes, et des relations logiques,
  - les relations entre variables doivent être explicites, on ne peut pas faire intervenir d'équations intégro-différentielles, ni de code de simulation.
- Spécificité liée à la démarche : la démarche est totalement différente de la démarche d'analyse, puisque l'on cherche à discriminer des solutions de conception en partant des relations qui contraignent et lient les variables de conception entre elles, puis en cherchant à déterminer quelles sont les valeurs possibles. Les modèles doivent donc s'écrire sous la forme de contraintes, c'est-à-dire de relations explicites entre variables de conception, qui doivent a priori toutes apparaître dans le modèle.

1 - V CONCLUSION

À ce stade, on peut mettre en évidence plusieurs éléments importants. Tout d'abord, les démarches de conception telles qu'elles sont envisagées actuellement ne permettent pas d'intégrer le calcul au plus tôt dans le cycle de développement, entraînant des itérations et des remises en cause tardives et coûteuses. Sébastian [Sébastian, 2003] montre la différence qui existe entre une démarche de conception normative (norme RG Aéro 00040) et une démarche orientée satisfaction de contraintes comme nous tentons de mettre en œuvre. L'intervention tardive du calcul de dimensionnement s'explique par les outils utilisés comme les outils de CAO ou de calcul par éléments finis, qui ne sont utilisables qu'en phase de conception détaillée, lorsque le produit commence à être bien défini.

On s'aperçoit également qu'il existe des travaux permettant d'aborder certains aspects de l'intégration du calcul en conception préliminaire, que ce soit par l'utilisation d'outils existants d'aide à la décision en conception préliminaire ou par la formalisation de modèles permettant de prendre en compte certaines limitations de la connaissance en conception préliminaire. Cependant, chacune de ces approches est confrontée à des limitations.

Les modèles de Physique Qualitative s'inscrivent dans une démarche d'utilisation des modèles par analyse, tandis que les métamodèles n'exploitent pas la connaissance du concepteur sur le système qu'il conçoit, puisque le modèle d'approximation obtenu est un modèle « boîte noire », dénué de signification physique ; en outre, leur mise en œuvre reste complexe.

Les outils par satisfaction de contraintes permettent une approche différente du problème de conception. Ils vont cependant à l'encontre d'une utilisation des modèles de comportement physique tels que les concepteurs peuvent être amenés à manipuler, puisqu'ils demandent une adaptation des modèles pour être cohérents avec une écriture par contraintes. Sawada présente l'exemple de conception d'un système de pompe à chaleur à l'aide d'un outil basé sur les contraintes [Sawada et Yan, 2002], il avance l'axiome suivant comme point de départ de ses travaux : « toute exigence technique rencontrée au cours du processus de conception peut être convertie en une expression algébrique (équations polynomiales ou inégalités) », ce qui nous paraît être une hypothèse forte.

Une réelle volonté d'intégration du calcul en phases préliminaires de conception demande la remise en cause de la démarche même d'utilisation et de formalisation des modèles de calcul en conception. L'objectif de ce document est de proposer une démarche de formalisation de modèles adaptés à la conception préliminaire. Notre approche de la modélisation est une approche téléologique, ce qui signifie que nous nous intéressons en premier lieu à la finalité et au besoin associés au calcul et à la modélisation en conception préliminaire. Cette analyse nous permet de proposer une démarche de formalisation de modèles adaptés à la conception préliminaire, basée sur les outils de l'analyse fonctionnelle.

CHAPITRE 2

DÉMARCHE de FORMALISATION de MODÈLES en CONCEPTION PRÉLIMINAIRE

2 - I INTRODUCTION

Nous faisons le constat suivant : il existe un certain nombre d'outils d'aide à la décision en conception préliminaire, mais il n'existe pas de démarche structurant la formalisation de modèles de comportement et permettant d'alimenter les bases de connaissances de ces outils. Nous proposons une démarche de formalisation de modèles adaptée à ces outils et cohérente dans un cadre de conception préliminaire.

Cette démarche globale s'appuie :

- sur une analyse du processus d'obtention d'un modèle d'une manière générale, puis de manière plus spécifique, une analyse de la modélisation en conception préliminaire,
- sur une décomposition du système à modéliser pour simplifier la modélisation,
- et enfin, sur une démarche d'amélioration du modèle, permettant de le faire évoluer en fonction du besoin.

2 - II MODÉLISATION

Nous présentons ici un certain nombre de définitions et de notions préalables, liées à la modélisation en général. Elles constituent le cadre de nos travaux de recherche.

2 - II.1 Qu'est-ce qu'un modèle ?

L'épistémologie propose des définitions à la fois suffisamment larges et explicites pour recouvrir les différentes activités liées à la construction et à l'utilisation de modèles.

La première définition du terme modèle que nous proposons est traduite de [Gass et Harris, 1996] :

« Un modèle est une représentation idéalisée – une description abstraite et simplifiée – d'une situation du monde réel à étudier ou à analyser. ».

Cette définition présente l'avantage d'être simple et de définir trois des principaux attributs d'un modèle : l'objet (ou la situation) modélisé, sa représentation, son abstraction. Nous lui reprochons cependant : d'une part, de ne pas évoquer le but du modèle, hormis le fait d'obtenir une représentation d'une situation donnée, et, d'autre part, nous récusons le terme de simplification, qui sous-entend une erreur, alors que l'abstraction traduit l'isolation d'une partie des éléments de l'objet d'étude, sans impliquer pour autant une inadéquation vis-à-vis de l'objectif exprimé.

Eriksson critique cette définition [Eriksson, 2003], basée sur l'approche épistémologique positiviste et réaliste, et reproche essentiellement le fait que l'objet ou la situation modélisée n'est pas nécessairement un objet ou une situation existante ou pouvant exister. La modélisation 3D est un exemple d'espace de représentation, où l'on peut modéliser des objets irréels issus de l'imagination. [Eriksson, 2003] propose celle-ci, qui est issue de la théorie constructiviste :

« Un modèle est une représentation physique de l'interaction téléologique, temporelle et récursive existant entre un sujet et un objet, où l'objet est un concept ou une perception. ».

Il considère donc que le processus de modélisation est essentiellement basé sur l'interaction entre sujet – celui qui modélise – et objet – qui est modélisé. Selon lui cette interaction implique les notions (i) de téléologie du modèle, c'est-à-dire d'objectif sous-tendu par le modèle, qui est en grande partie déterminé par le but précis dans lequel il est construit, (ii) de temporalité et (iii) de récursivité. Nous pensons pour notre part que les notions de temps et de récurrence sont plus propres au processus de modélisation qu'au modèle lui-même, c'est-à-dire que le modèle évolue effectivement dans le temps, en fonction de la connaissance acquise et des objectifs qui peuvent évoluer pendant le processus de modélisation.

La dernière définition que nous discutons est issue de [Soler, 2000] :

« Un modèle est une représentation théorique qui ne prétend pas décrire fidèlement l'objet d'étude, mais qui revendique au contraire son caractère *délibérément schématique*, en même temps que sa *fécondité* eu égard à un objectif spécifié. ».

Cette définition reprend une partie des notions proposées par les définitions précédentes. L'auteur insiste sur l'aspect schématique du modèle. Cet aspect est indéniable, et la perte d'information due à cette forme de schématisation doit être maîtrisée en conséquence, mais dans la mesure où le modèle est en adéquation avec l'objectif visé, il n'est pas important que le modèle représente exactement l'objet d'étude.

Des définitions et critiques précédentes, nous déduisons notre propre définition du terme modèle. Nous définissons un modèle par ses propriétés essentielles, qui nous paraissent pertinentes, notamment pour les modèles en conception. Nous retenons ainsi les caractéristiques suivantes, intrinsèques à un modèle :

- la **notion d'objet d'étude** auquel le modèle se rapporte, qui constitue de fait une référence,
- le **caractère abstrait**[1] d'un modèle, qui le distingue de l'objet réel, ceci sous-tend forcément une logique de schématisation, d'éléments pertinents du modèle, et par conséquent une perte d'information,
- la **notion de représentation**, ce qui signifie qu'il existe un support de représentation – par exemple : les graphes, les schémas, les relations symboliques, mathématiques, les modèles géométriques 3D ; selon Eriksson [Eriksson, 2003], tout support physique (au sens de concret) perceptible par les cinq sens humains –, enfin,
- la **notion de besoin :** le modèle est créé dans un but précis ; il doit être en cohérence avec les objectifs et leurs niveaux d'appréciation, pour lesquels il est créé.

Il existe donc de manière intrinsèque au modèle, un écart à l'objet d'étude dû à l'abstraction, qui peut être accepté, si le besoin lié à l'utilisation du modèle est satisfait vis-à-vis des objectifs. Ainsi, il existe nécessairement un compromis lié à l'utilisation d'un modèle, ce compromis doit être géré entre l'aspect réducteur du modèle par rapport à l'objet modélisé et le besoin lié au modèle. Afin de pouvoir évaluer si un modèle est en adéquation ou non avec l'utilisation qu'on souhaite en faire, il est préférable d'évaluer simultanément ces deux aspects (schématisation et besoin), qui sont dépendants du problème posé et du modèle proposé.

[1] **abstraction :** opération intellectuelle consistant à isoler de tous les autres un élément (qualité ou relation) d'une représentation [Hachette, 1999].

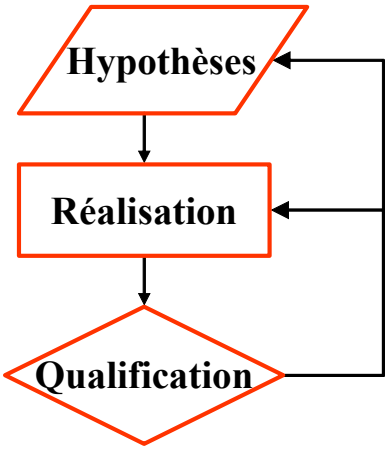


Figure 2-1 : Schéma générique de formalisation d'un modèle

C'est pourquoi nous distinguons trois phases distinctes et essentielles de la formalisation d'un modèle (*cf.* figure 2-1) : une phase d'hypothèses, une phase de réalisation, et enfin, une phase de qualification du modèle, qui valide les deux premières étapes et éventuellement les remet en cause.

Chacune de ces trois phases permet respectivement d'aboutir à la réalisation de chacun des aspects du modèle : l'abstraction du modèle résulte de la phase de formation des hypothèses, la phase de réalisation contribue à obtenir le support du modèle (ou sa représentation) et la qualification mesure le niveau d'adéquation entre le modèle et le besoin attendu (figure 2-2).

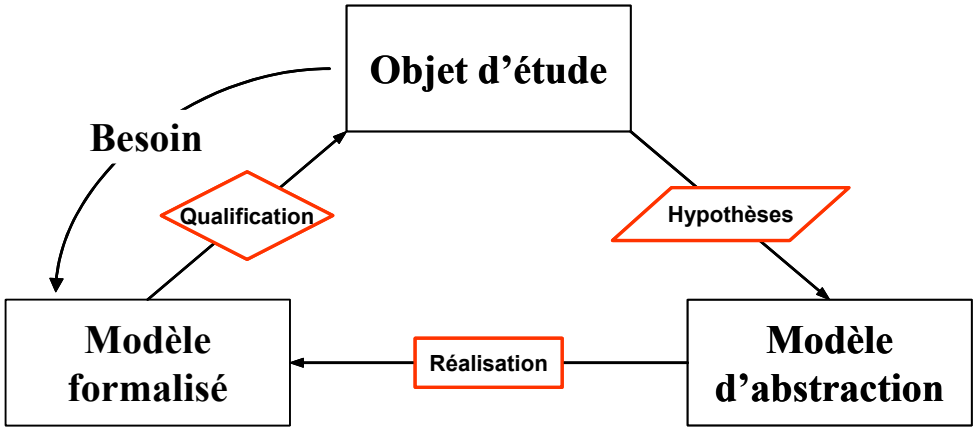


Figure 2-2 : Les caractéristiques intrinsèques au modèle et les étapes de formalisation

Un modèle est une représentation d'un objet d'étude, sous une forme donnée, issue de son abstraction, et satisfaisant un besoin associé à son utilisation. On peut réduire la modélisation à un processus simplifié permettant d'aboutir au modèle par trois étapes : hypothèses, réalisation et qualification.

2 - II.2 Les étapes de la formalisation d'un modèle

Nous détaillons dans la suite chacune de ces trois phases et nous illustrons notre propos dans le cadre de la formalisation de modèles de simulation pour la conception préliminaire.

2 - II.2.1 Hypothèses

Comme on l'a vu précédemment, la définition d'un modèle sous-tend nécessairement la notion de schématisation, il est donc nécessaire de définir de manière exhaustive le cadre de représentation de l'objet qui est modélisé, ainsi que le cadre de validité du modèle.

L'abstraction du modèle, en conception préliminaire, demande à isoler les grandeurs et les phénomènes physiques pertinents du système à modéliser. Il faut donc, pour énoncer des hypothèses, être capable de discerner les éléments, les phénomènes physiques pertinents de l'objet d'étude en vue de la représentation de l'objet sous une forme ou sur un support physique donné.

Cette identification suit le processus suivant :

- analyser de manière exhaustive le comportement de l'objet étudié,
- identifier des grandeurs caractéristiques pertinentes du fonctionnement,
- par l'analyse et par comparaison de l'influence des phénomènes physiques sur les grandeurs physiques pertinentes identifiées, définir les phénomènes physiques pertinents du fonctionnement de l'objet d'étude.

Il faut établir cette identification des éléments pertinents du système réel de manière exhaustive, afin de capitaliser le modèle en vue d'une réutilisation ultérieure.

Les hypothèses peuvent être associées : à un comportement spécifique ou bien à une gamme de comportements possibles identifiés pour un phénomène donné, à des formes géométriques particulières, à des domaines de validité, à la négligence d'un phénomène ou de termes mathématiques, etc.

Les hypothèses réduisent le modèle aux éléments pertinents de l'objet réel et permettent également de baliser l'espace d'utilisation du modèle à un domaine restreint. Puisque le modèle n'a pas pour vocation d'être universel, on observe une notion importante de spécialisation inhérente à la formation d'hypothèses. Les hypothèses formulées permettent de restreindre le cadre de validité du modèle en annulant ou en bornant les domaines de variation des grandeurs identifiées comme caractéristiques du fonctionnement, et également de limiter son espace de représentation aux phénomènes pertinents.

Généralement, un modèle d'abstraction est défini aux stades préliminaires de la modélisation. Ce dernier est une vision de l'esprit de l'objet à modéliser, pour laquelle on a éliminé les aspects les moins pertinents de la représentation de l'objet pour ne considérer que ceux qui sont essentiels au regard des objectifs. Le modèle d'abstraction implique généralement un grand nombre d'hypothèses intrinsèques non formulées.

Il est cependant nécessaire de formuler les hypothèses délimitant le cadre de représentation, puisqu'elles ont une influence sur la formulation du modèle. En outre, dans le cadre éventuel d'une utilisation

ultérieure du modèle, la formulation exhaustive des hypothèses est importante en vue de capitaliser les modèles écrits.

Il existe une notion de risque lié à la production d'hypothèses quand elles sont difficiles à justifier ou quand on n'a pas de recul sur la connaissance du comportement du système. L'énoncé d'hypothèses fait donc appel à des raisonnements caractéristiques des connaissances d'expert, puisque essentiellement basées sur l'expérience. C'est pourquoi les hypothèses sont souvent liées à des règles métiers, c'est-à-dire issues de l'expérience et/ou de constatations récurrentes. Cette constatation renforce l'idée selon laquelle, il est nécessaire de capitaliser les hypothèses associées au modèle, puisqu'elles constituent une part importante de la connaissance liée aux modèles.

C'est cette phase qui va conditionner le caractère schématique du modèle, elle a donc une part importante d'influence sur les résultats du modèle.

2 - II.2.2 Réalisation

La **phase de réalisation** est la phase d'expression du modèle à proprement parler ; à la suite de cette étape, le modèle doit être complètement défini. Elle inclut donc l'écriture du modèle sur ce que nous avons appelé le support de représentation.

Le besoin lié à un modèle de conception préliminaire est d'évaluer les performances de différentes configurations de conception du système, et donc de donner des valeurs à des grandeurs propres à chaque configuration qui seront comparées aux objectifs issus du cahier des charges. Le support de représentation du modèle doit permettre de faire ces évaluations, ce sont donc généralement des modèles de calcul, qui font intervenir les variables liées aux grandeurs du système ; c'est-à-dire plutôt sous formes mathématique ou informatique des règles logiques, statistiques, probabilistes, équations intégro-différentielles, matricielles, algébriques, schémas, graphes, etc.

Cette étape fait intervenir les connaissances de la ou des personnes qui construisent le modèle, elle peut faire appel à leurs connaissances propres, ou à la culture de l'entreprise, ou encore à des modèles existants, présents dans des bases de données, par exemple.

Cependant, pour être cohérent avec la phase précédente, le modèle doit également présenter de manière explicite :

- en toute rigueur, les phénomènes physiques identifiés lors de la phase d'hypothèses et modélisés,
- le cadre de validité du modèle ; il est constitué de l'association d'ensembles des valeurs possibles : de variables discrètes (numériques ou symboliques), d'intervalles de valeurs, de catalogues, ou sous forme de règles logiques, d'inégalités, etc.

Cette phase n'inclut pas de calcul, ni de résolution qui, à notre sens, font partie des phases d'adaptation et de résolution des modèles qui seront détaillées dans la suite du document et que nous dissocions de la phase de modélisation.

2 - II.2.3 Qualification

Nous désignons par **qualification de modèle** la démarche qui a pour objet de valider les deux étapes précédentes par rapport au besoin inhérent au modèle. Il faut qualifier le modèle issu de l'étape de réalisation, conditionné lui-même par les hypothèses définies au préalable.

Nous pensons qu'il est nécessaire de qualifier le modèle obtenu dans les deux phases précédentes : (a) de manière intrinsèque au modèle, (b) par rapport au besoin et aux critères d'appréciation du besoin.

a. Qualification intrinsèque au couple hypothèse/réalisation

Certaines hypothèses faites à la première étape de la modélisation, nécessitent d'être validées par rapport aux résultats obtenus grâce au modèle. Ce sont des hypothèses faites a priori, en supposant que certaines valeurs des variables déterminées par le modèle (variables endogènes) restent dans un certain intervalle, cohérent avec le phénomène physique modélisé. Si ce n'est pas le cas, les hypothèses incriminées doivent être remises en cause, ou les parties du modèle consécutives à ces hypothèses reformulées.

b. Qualification par rapport au besoin

L'évaluation de l'adéquation du modèle avec le besoin doit se faire à deux niveaux : est-ce que le besoin est atteint, avec quel degré de satisfaction il est atteint. On peut ainsi faire un parallèle avec l'analyse du besoin en conception, qui fait intervenir les services que le produit doit rendre sous forme de fonctions (besoin), ainsi que le niveau d'appréciation de chaque fonction (niveau d'adéquation au besoin).

Dans le cadre de la conception préliminaire, comme nous l'avons déjà évoqué, le modèle a un rôle prédictif. L'objectif est donc de prévoir au mieux le comportement du système étudié.

Il faut donc vérifier que le modèle permet effectivement de prédire et comparer les performances des différentes configurations potentiellement solutions de conception du système, et, si c'est le cas, quel est le niveau d'adéquation avec le besoin attendu.

L'estimation des performances attendues du système étant le but des modèles de conception, ce sont ces résultats qui sont évalués.

Nous proposons d'utiliser quatre critères d'appréciation intrinsèques à un modèle, afin de mesurer le niveau d'adéquation d'un modèle à cet objectif : deux critères associés à son exploitation (parcimonie, spécialisation) et deux autres associés aux résultats du modèle (exactitude, précision).

1. la ***parcimonie*** : formellement, la parcimonie traduit la capacité d'un modèle à décrire correctement le comportement du système avec un nombre minimum de paramètres et d'équations. Dans notre cas, nous entendons plus simplement par parcimonie, l'inverse du nombre de variables et d'équations d'un modèle. Ainsi, un modèle est d'autant plus parcimonieux qu'il nécessite peu de variables et d'équations.

2. la ***généralité***, qui caractérise l'étendue du domaine d'application du modèle. A contrario, on peut également utiliser la ***spécialisation*** d'un modèle pour désigner le domaine d'application auquel il est restreint.

Les niveaux de parcimonie et de spécialisation du modèle vont conditionner les possibilités d'utilisation directe du modèle (temps de calcul, outil de traitement du modèle utilisable ou non).

La notion de modèle décrivant « correctement » le système est évidemment totalement dépendante de la fiabilité et de la confiance que l'on peut attribuer au modèle et aux valeurs des paramètres du modèle. Aussi, nous utilisons également l'exactitude et la précision associées au modèle.

3. l'***exactitude***, qui procure une appréciation de « la distance entre la solution du modèle et le comportement de « référence », qui est généralement le comportement observé du système réel » [Travé-Massuyès et al., 1997].

   L'exactitude d'un modèle est toujours difficile à évaluer. En particulier, lorsque le modèle est un modèle prédictif, l'objet d'étude est constitué d'éléments connus mais il n'existe pas encore, aussi il est impossible d'observer le comportement réel de l'objet d'étude. C'est pourquoi, l'estimation de l'exactitude se fait par comparaison à ce que l'on définit comme une référence – qui peut se présenter sous diverses formes comme un modèle, des données, etc. – dont on suppose qu'elle est exacte.

   Une référence doit donc être déterminée afin de comparer les résultats du modèle à celle-ci, nous avons identifié qu'elle pouvait être de trois sortes :

   - un exemplaire de l'objet à modéliser lui-même (*e.g.* un prototype), dans le cas où des essais ont été réalisés, on peut alors valider le modèle par rapport aux résultats des essais disponibles,
   - un modèle existant et réputé exact, par exemple, un modèle très détaillé issu de recherches,
   - un modèle existant constituant une référence dans le domaine, selon le nombre et la qualité des retours d'expérience dont il bénéficie ; par exemple, les codes de calcul professionnels (CODAP [SNCT, 2000], etc.).

4. la ***précision***, qui définit l'étendue du domaine des valeurs possibles d'une variable. Elle est due soit au niveau de représentation du modèle, soit à l'incertitude[2] liée aux variables.

L'exactitude et la précision du modèle vont conditionner la validité de l'utilisation du modèle. Pour deux modèles d'un même système, on peut trouver des estimations différentes de ces critères, et nous pensons qu'ils permettent de faire un choix, une sélection entre 2 modèles.

c. Décision consécutive à la qualification du modèle

Par comparaison des estimations de chaque critère par rapport aux niveaux d'adéquation attendus – ce qui suppose que de tels niveaux ont été définis préalablement à la modélisation –, on peut avoir une appréciation du niveau d'adéquation du modèle aux objectifs attendus.

[2] On distingue l'incertitude de l'imprécision. Une information imprécise se traduit par un ensemble de valeurs possibles et mutuellement exclusives, alors que l'incertitude se caractérise par l'incapacité à savoir si un choix est correct ou non [OFTA, 1994].

Les quatre paramètres présentés et définis précédemment peuvent être regroupés sous l'acronyme P.E.P.S. (pour ***Parcimonie***, ***Exactitude***, ***Précision*** et ***Spécialisation***). On utilisera un artifice de langage pour signifier que l'on qualifie le modèle relativement à ces quatre critères : « le PEPS d'un modèle ». On utilisera la représentation de la figure 2-3 pour illustrer le niveau de qualification du PEPS d'un modèle. Ces quatre critères sont fortement liés entre eux, mais il est possible de faire évoluer le PEPS d'un modèle.

Nous détaillons au chapitre 4, les définitions données précédemment, ainsi que les liens existant entre ces 4 paramètres.

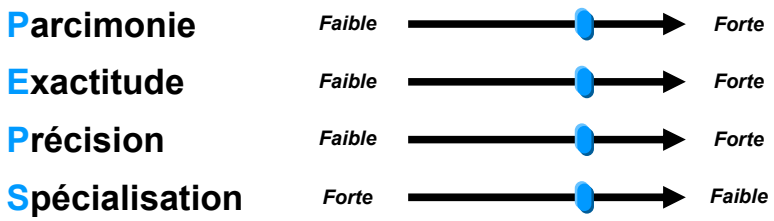


Figure 2-3 : Schéma récurrent illustrant les niveaux de parcimonie, d'exactitude, de précision et de spécialisation d'un modèle, idéalement, les « curseurs » doivent être tous dirigés vers la droite.

Nous pensons donc que ces quatre critères de qualification du besoin sont pertinents et permettent d'évaluer le risque inhérent à l'utilisation d'un modèle, notamment en **aide à la décision**. L'utilisation de ces quatre critères se justifie par le besoin lié aux modèles en aide à la décision, que nous avons en partie décrit précédemment : un modèle doit prédire correctement le comportement du système, mettre en présence les variables nécessaires aux choix du concepteur et être cohérent avec l'outil de traitement des modèles (syntaxe, parcimonie).

1. Ainsi, dans une optique d'aide à la décision, un modèle très peu **exact** n'aide pas à faire des choix puisqu'il ne représente qu'imparfaitement le comportement réel du système, ou alors les choix faits sont mauvais à cause de l'incohérence du modèle avec la réalité.
2. Un modèle très peu **précis** empêche de faire des choix, car l'indétermination sur les valeurs des variables ne permet pas de prendre une décision objective.
3. De la même manière, un modèle trop **spécialisé** peut être inadapté, soit parce que le modèle, de par son domaine de validité, oriente déjà fortement les choix de conception, soit parce qu'il ne permet pas d'explorer la majeure partie de l'espace de conception, on se prive alors de solutions de conception potentielles.
4. Enfin, un modèle trop faiblement **parcimonieux** peut ne pas être traité pour des problèmes de complexité. Les modèles les plus importants que nous avons résolus avec le logiciel que nous utilisons pour traiter les modèles – *Constraint Explorer*, développé par Dassault Aviation –, faisaient intervenir plusieurs centaines de variables liées entre elles par un nombre de contraintes du même ordre de grandeur.

La qualification d'un modèle en conception préliminaire implique l'estimation de la valeur de ces quatre paramètres : Parcimonie, Exactitude, Précision et Spécialisation (PEPS), qui constituent, selon nous, une caractéristique intrinsèque à tout modèle. Un des buts de l'estimation de ces critères est de pouvoir utiliser cette information pour son exploitation ultérieure, et de prendre une décision à l'aide du modèle en connaissant la part de risque inhérente au modèle grâce à l'appréciation de son PEPS.

Le PEPS d'un modèle est donc d'autant meilleur du point de vue de l'aide à la décision que le modèle est parcimonieux, exact, précis et peu spécialisé.

2 - II.3 Conclusion

Nous avons défini dans cette section ce qu'était, à notre sens, **un modèle**. Nous attachons beaucoup d'importance au processus de formalisation présenté, ainsi, il est constitué selon nous de manière indissociable des résultats des trois étapes : **hypothèses**, **réalisation**, **qualification**.

Par conséquent, la réutilisation d'un modèle existant ne doit pas se faire uniquement à l'aide des relations du modèle obtenues lors de l'étape de réalisation. Elle doit également intégrer les résultats des étapes d'hypothèses et de qualification. On transmettra les hypothèses émises et une estimation de son PEPS avec un modèle, afin de connaître le risque inhérent à l'utilisation de ce modèle dans une démarche d'aide à la décision, ou pour le comparer à un autre modèle pour faire un choix entre les deux.

En posant le cadre de notre travail, nous avons soulevé un certain nombre de questions auxquelles nous tentons de répondre dans des chapitres ultérieurs :

- Nous avons montré que le modèle était indissociable du besoin pour lequel il est créé, nous exprimons dans la section suivante quel est le besoin lié aux modèles en conception préliminaire.
- Nous avons indiqué que le modèle était associé à l'objet d'étude qu'il représente, et qu'il était nécessaire d'en analyser les éléments pertinents, nous présentons dans la section 2 - IV de ce chapitre comment procéder pour y parvenir.
- Nous avons défini quatre critères de qualification du besoin des modèles. Il est nécessaire de détailler la manière dont ces critères sont évalués. Ce point fera l'objet d'un chapitre ultérieur (*cf.* chapitres 4 et 5).
- Enfin, nous n'avons pas encore évoqué la démarche à adopter lorsque le modèle proposé n'était pas en adéquation avec le niveau de qualification souhaité. Cette démarche fait également l'objet d'un développement ultérieur (*cf.* chapitre 6).

2 - III MODÉLISATION EN CONCEPTION PRÉLIMINAIRE

2 - III.1 Analyse du besoin

Nous avons présenté dans le chapitre 1, les différents travaux dont l'objectif est d'améliorer l'utilisation de la simulation en conception.

Pour notre part, nous avons porté notre attention sur la définition d'une logique systématique d'écriture de modèles en conception préliminaire, ainsi que sur la qualification des modèles et des choix de conception. Après avoir tenté d'analyser les enjeux de la notion de modélisation dans un cadre général, nous allons établir quel est le besoin lié à la modélisation en conception. Ainsi, dans le paragraphe précédent, nous avons introduit les notions de modèle, d'hypothèse, de réalisation, de qualification liées à la modélisation, nous essayons dans le paragraphe suivant de définir le besoin lié aux modèles en conception préliminaire.

2 - III.1.1 Propriétés des modèles en conception en fonction de leur utilisation

Nous entendons ici par calcul, l'activité qui consiste à évaluer et prédire les performances liées au comportement physique d'un concept de solution par l'intermédiaire d'un modèle.

Pourroy *et al.* [Pourroy et al., 1998] analysent les liens qui existent entre les activités de conception et de calcul, ils distinguent notamment deux types d'utilisation du calcul en conception :

1. le calcul en vue de l'aide à la décision, en phase de conception architecturale,
2. le calcul dans une démarche de validation de choix, en phase de conception détaillée.

1. Les modèles utilisés dans le cadre de l'**aide à la décision** ne fournissent généralement que des résultats « globaux » et sont souvent simples et peu détaillés pour permettre une évaluation rapide de plusieurs concepts. Ainsi, ils ne rendent pas toujours compte de manière réaliste du comportement du produit, et par conséquent, ne renseignent que partiellement le concepteur.

En particulier, lorsqu'il faut analyser l'influence d'un choix de concept d'un composant sur la performance globale du système, qui peut dépendre fortement des dimensions propres au composant, le niveau de détail du modèle va influencer les choix de concepts pour les composants et pour l'architecture. Or, ces modèles peuvent ne pas faire apparaître le niveau de détail souhaité par le concepteur aux stades préliminaires de la conception, que ce soit par l'absence de certaines variables influant sur l'optimum global ou par l'absence d'un composant dans le modèle.

En outre, ce type de modèle présente généralement de fortes incertitudes sur les résultats fournis, et ces imprécisions peuvent se répercuter sur les choix et donc rendre les modèles impropres à l'aide à la décision. En revanche, l'imprécision peut être utile, dans la mesure où, à ce stade de la conception, le concepteur peut accepter des intervalles de valeurs au bénéfice d'une évaluation rapide des concepts (le modèle, même imprécis, reste exact).

Enfin, ils peuvent être suffisamment simples pour permettre une écriture du modèle qui soit paramétrique et donc explicite par rapport à certaines variables de conception. Le concepteur peut alors faire une analyse de sensibilité et faire un choix en connaissant l'influence d'une variable sur la performance du produit, ce qui est bien adapté à la conception préliminaire.

2. L'utilisation du calcul pour **la validation** de choix suit une démarche séquentielle basée sur le principe d'essais-erreurs – que l'on peut qualifier d'analyse. Elle consiste à effectuer des hypothèses de topologie, de forme, de dimensions, etc., évaluer les performances d'une solution après avoir à l'aide de modèles de simulation numériques du type éléments finis ou différences finies par exemple. Ce type de modèles permet de prédire le comportement du système à un niveau de détail plus poussé. La démarche d'analyse est cependant pénalisante, car la moindre remise en cause d'un choix antérieur oblige une reprise du processus de conception et des modifications préjudiciables au temps de développement.

Étant données les capacités actuelles de l'informatique, cette seconde démarche n'est pas exploitable en conception préliminaire, puisque les modèles de simulation demandent des temps de calcul et d'élaboration trop importants et ne permettent pas une exploration rapide et exhaustive de l'espace de conception. De plus, l'élaboration d'un tel modèle en conception préliminaire est difficile, du fait que le produit n'est pas nécessairement suffisamment défini (matériau, dimensions, conditions aux limites) pour en permettre la construction.

2 - III.1.2 Conséquences en terme de modélisation

De manière schématique, le concepteur peut donc s'appuyer sur deux types de modèles de simulation pour faire ses choix. D'une part, des modèles de simulation le renseignant de manière détaillée (comportements locaux) sur le comportement du système pour des valeurs données de variables de conception, mais coûteux et ne permettant pas réellement de faire des choix de conception, mais plutôt de les valider. D'autre part, des modèles peu détaillés mais présentant généralement plus d'incertitude sur l'exactitude des résultats donnés par le modèle.

La conclusion que nous pouvons tirer de ces constatations est que les modèles de comportement physique utilisés dans les phases de conception ne font pas du tout l'objet des mêmes besoins et des mêmes niveaux d'adéquation au besoin en aide à la décision et en validation (*cf.* tableau 2-1).

Tableau 2-1 : Objectifs de modélisation en conception

	MODÈLE D'AIDE À LA DÉCISION	MODÈLE DE VALIDATION
Parcimonie	Modèle parcimonieux	Modèle très peu parcimonieux (milliers de variables)
Exactitude	Modèle exact et prédictif	Modèle exact et descriptif
Précision	Connue et maîtrisée	La plus grande possible
Spécialisation	Modèle le plus général possible, pour étudier un espace de solutions de conception étendu	Modèle très spécialisé, limité à une solution de conception
Niveau de détail	En cohérence avec l'état d'avancement ; variables globales (moyenne, etc.) ou locales mais associées à un point particulier	Très élevé ; variables associées à des champs de grandeurs physiques
Coût / Traitement	Couvrir la plus grande partie de l'espace des solutions à moindre coût	Accepte un fort coût de simulation

2 - III.1.3 Critères de qualification de la conception en aide à la décision

D. Scaravetti (DS) développe une méthode afin d'extraire du problème global de conception dans les phases préliminaires, les fonctions et critères qu'il qualifie de **structurants** pour la suite de la conception ; c'est-à-dire, les caractéristiques permettant de limiter l'étendue du problème de conception, en vue de définir une première architecture et les premiers blocs fonctionnels. Il construit cette analyse préalable à la conception préliminaire autour de quatre niveaux d'analyse et de représentation : (i) une approche liée à **l'analyse du besoin**, (ii) une **approche fonctionnelle** (expression du cahier des charges fonctionnel), (iii) une **approche organique** (décomposition structurelle du produit), et enfin (iv) une **approche physique** (analyse des flux fonctionnels et de leurs effets induits). À chaque phase d'analyse, DS identifie de manière exhaustive les critères de conception et les indicateurs de pertinence de la conception qui doivent être évalués pour qualifier la conception (thèse D. Scaravetti, chap. 4 [Scaravetti, 2004]).

1. Première phase : l'analyse du besoin permet d'identifier les variables critères qui sont des critères globaux de performances et de qualité. Ils correspondent à une vision du système dans son ensemble et à des critères de performance globale du produit. Ces critères sont donc associés à des objectifs de conception et à des critères de qualité que l'on cherche à optimiser en vue d'obtenir une conception optimale.
2. La deuxième phase d'analyse du problème, la phase fonctionnelle, permet de mettre en évidence les différentes fonctions que le système devra assurer afin de remplir les besoins identifiés dans la phase précédente. Dans le cadre de l'analyse fonctionnelle externe, chaque fonction du système est associée à un ou plusieurs critères de qualification qui assurent la validation de la réalisation de la fonction en évaluant par exemple l'éloignement à une valeur de référence.

3. La phase 3 de la structuration du problème est une approche organique du système. La décomposition met en évidence différents critères liés entre autres à la sûreté de fonctionnement du système (fiabilité, disponibilité, maintenabilité).
4. L'approche physique est décrite dans la quatrième phase. L'analyse du cheminement des flux fonctionnels permet la qualification, par le concepteur, de la réalisation des fonctions. À cette fin, on utilise les trois premières lois d'évolution (données en annexe 1) de la théorie TRIZ [Savransky, 2000] pour déterminer les critères de pertinence de la conception. La phase 4 constitue également l'objet de notre démarche de formalisation de modèle présentée au paragraphe 2 - IV.

L'ensemble de ces variables critères identifiées aux différentes phases du processus de structuration du problème de conception fournit au concepteur des éléments de qualification de la conception, qu'il doit pouvoir évaluer, notamment à l'aide des modèles.

On peut distinguer tout au long du processus de conception deux types de modèles de calcul. Les modèles d'aide à la décision en conception préliminaire et les modèles de validation en conception détaillée ne satisfont pas aux mêmes besoins de qualification.

- **Pour la qualification des modèles, le besoin en terme de PEPS de ces deux types de modèles diffère sensiblement.**
- **Pour la qualification de la conception, les modèles d'aide à la décision doivent permettre d'évaluer les critères de pertinence de la conception du système.**

Un modèle de conception préliminaire doit faire apparaître des variables permettant de déterminer les valeurs de ces critères.

Certaines techniques de modélisation proposées par la communauté de recherche « conception intégrée » (*cf.* chapitre 1) répondent à une partie des besoins, mais il n'existe pas de démarche globale qui soit cohérente avec les besoins présentés précédemment, c'est ce que nous cherchons à mettre en place : une méthodologie ou une stratégie de formalisation de modèles adaptés à la conception préliminaire, en termes de qualification de la conception et de qualification des modèles.

2 - III.2 Modélisation en conception préliminaire

Le but de l'utilisation du calcul en conception est d'évaluer les performances d'une solution de conception en limitant les essais et le nombre de prototypes. Cette évaluation passe par la détermination de grandeurs physiques qui sont des critères de pertinence de la conception. La détermination des valeurs de ces grandeurs physiques en fonction des choix de conception passe donc par l'utilisation de modèles dont l'espace de représentation fait appel au formalisme symbolique et mathématique ; les modèles manipulés font donc intervenir classiquement des équations et des variables. Nous n'avons pas précisé jusqu'ici le type de modèles qui intervenaient dans la modélisation en conception préliminaire. Nous n'avons pas non plus expliqué la notion de variables qui est propre à une écriture physique des modèles sous la forme de relations mathématiques, logiques, etc. C'est l'objet de cette section.

2 - III.2.1 Variables des modèles de conception

a. Quelques définitions, réflexions

1. **Variable :**

« Grandeur physique, dont la valeur mesurée sur un système donné ne reste pas constante lorsque le système évolue. » [Hachette, 1999].

« Entité dont la valeur peut être indéterminée, ou éventuellement rester dans des limites connues, jusqu'à ce qu'une valeur effective lui soit affectée dans une application donnée. » [OQLF, 2004].

Les deux définitions précédentes permettent, en se complétant, de donner une définition plus large des variables constitutives d'un modèle de comportement physique en conception. En effet, les variables de ces problèmes peuvent être à la fois des grandeurs physiques, ou des entités. On peut ainsi trouver une multitude de variables pouvant intervenir dans l'écriture d'un modèle de conception (*cf.* paragraphe suivant) et permettant de définir un système donné : dans un même modèle, peuvent par exemple intervenir des variables d'état (grandeur physique) et des types de matériaux (entité). Pour des raisons de commodité d'utilisation du modèle, on fait généralement intervenir, pour la variable matériau, des paramètres de caractérisation physique dont la valeur dépendra de chaque matériau, par exemple : densité volumique, coefficient de dilatation volumique, etc.

2. **Paramètre :**

« Variable à laquelle on assigne une valeur constante déterminée pour chaque cas particulier et qui éventuellement identifie ce cas. » [OQLF, 2004].

Le mot paramètre est donc souvent utilisé pour décrire des grandeurs physiques constantes dans une situation donnée ; ce sont généralement des grandeurs caractérisant un milieu, un matériau, par exemple : densité volumique, viscosité cinématique, conductivité thermique, etc. Dans un cas d'étude comme la flexion d'une poutre droite en acier, le module d'Young n'est pas considéré comme une variable mais comme un paramètre, sa valeur est fixe dans ce cas d'étude précis mais elle peut prendre différentes valeurs selon l'acier considéré.

Il peut arriver cependant que ces termes soient des données d'entrée d'un modèle et qu'on cherche à connaître leur influence sur le comportement du système. Ils deviennent alors des variables à proprement parler. En outre, les paramètres peuvent être fonction d'autres variables du modèle, par exemple : $E=f(T)$, $\mu=f(T)$, $C_p=f(T)$ [3], etc.

- **Une variable est une grandeur, physique ou non, caractéristique d'un système. Sa valeur n'est pas fixée, elle est déterminée par le calcul.**
- **Une grandeur dont la valeur est fixée est une constante.**
- **Nous n'utilisons pas le terme de paramètre.**

[3] E : module d'Young, μ : viscosité dynamique, C_p : capacité calorifique massique, T : température.

b. Besoin

Le besoin lié à la modélisation physique en aide à la décision, est uniquement de pouvoir caractériser plusieurs configurations de conception les unes par rapport aux autres. Plus précisément, ce sont les valeurs des variables qui déterminent le système, qui constituent le besoin en conception. On pourrait affirmer en quelque sorte que le modèle en lui-même n'est pas important, seules comptent les valeurs des variables et la cohérence des valeurs des variables.

Pour notre part, nous différencions les variables suivant trois sortes : les variables de conception, les variables critères et les variables intermédiaires. On retrouve ce type de distinction entre les variables chez plusieurs auteurs [Mulyanto, 2000, Antonsson et Otto, 1995] éventuellement sous d'autres dénominations.

1. Les **variables de conception (VCo)** sont celles qui permettent **de distinguer par leurs valeurs deux configurations de conception**. C'est l'instanciation de toutes les variables de conception qui définit totalement une solution de conception potentielle. Exemple de variables de conception : une longueur, un rayon de courbure, un matériau, une référence dans un catalogue, une couleur, une forme de section, un nombre d'éléments, etc.
2. Les **variables critères (VCr) traduisent les propriétés, l'état ou la qualité d'une configuration de conception**. Ces caractéristiques peuvent être liées ou non au comportement physique d'une configuration donnée et sont généralement directement dépendantes des variables de conception. Elles permettent ainsi de qualifier les performances et la qualité de la configuration associée par rapport aux objectifs du cahier des charges. Ce critère est alors comparé aux niveaux d'appréciation définis dans le cahier des charges, c'est un critère de qualification client [Scaravetti et al., 2004]. Les variables critères peuvent également être en lien avec des contraintes métiers ou des contraintes de comportement physique. Par exemple, le niveau sonore d'un élément, la durée de vie, la contrainte ou la déformation maximum dans une section, le coût, la masse, des pertes de charge sont des variables critères.

A priori, seules les variables de conception et les variables critères sont nécessaires à la modélisation en conception préliminaire. On peut même affirmer que seules les valeurs de ces variables pour chaque proposition de solution de conception sont « utiles », puisque la comparaison de ces valeurs suffit à aider à des choix de conception. Les VCo et les VCr sont les variables structurantes des modèles de description physique en conception préliminaire [Scaravetti et al., 2003].

3. Les **variables intermédiaires (VI)** sont les variables qui ne sont ni des variables de conception, ni des variables critères. Nous différencions plusieurs types de variables intermédiaires selon qu'elles sont liées au système, à l'environnement extérieur ou qu'elles interviennent dans l'écriture des modèles du problème de conception pour participer à la cohérence du modèle. Ainsi, parmi les variables intermédiaires, nous comptons essentiellement des variables exogènes (variables dont la valeur est fournie par des facteurs extérieurs au modèle) parmi lesquelles :
   - les variables imposées par le cahier des charges ou par l'environnement : température, hygrométrie de l'air extérieur, débits, efforts extérieurs, etc.

- les variables de caractérisation physique propres à un milieu : chaleur latente, pression de vapeur saturante, capacité calorifique massique, module d'Young, etc.
- les variables agrégées : tous les nombres adimensionnels du type nombre de Reynolds, les variables ayant un sens physique non directement mesurable : module de flexion, de torsion, des variables agrégées sans sens physique apparent[4], etc.
- les variables « test », etc.

Comme nous l'avons affirmé précédemment, les seules variables indispensables pour un modèle utilisé en aide à la décision sont les variables de conception et les variables critères. L'idéal serait donc de pouvoir proposer un modèle constitué de relations ne faisant intervenir que des VCo et des VCr, puisque les autres variables sont superflues et ne font qu'assurer une cohérence physique.

- **Les variables de conception (VCo) définissent le système.**
- **Les variables critères (VCr) traduisent son état ou ses propriétés.**
- **Les variables intermédiaires (VI) participent à la cohérence du modèle.**

Il existe, pour la modélisation en conception préliminaire, une notion de variables « juste nécessaires » (VCo et VCr) et de variables « non demandées » (VI) au sens de l'analyse de la valeur.

Un modèle parcimonieux devra faire intervenir toutes les variables de conception et toutes les variables critères tout en limitant le nombre de variables intermédiaires.

Les variables de conception, critères ou intermédiaires feront intervenir des grandeurs physiques ou non physiques parmi les variables suivantes :

- Grandeurs physiques :
  - Géométrie : sections, longueur, largeur, épaisseur, hauteur, diamètre, rayon de congé, angles, espacement, etc.
  - Efforts : efforts extérieurs (actions de contact, à distance, etc.), efforts internes (pression, contraintes, etc.),
  - Variables ou fonctions d'état : pression, température, concentration, entropie, enthalpie, énergie interne, etc.
  - Variables dérivées : gradients, dérivées, vitesse, déplacement, déformation, accélération, tenseurs de déformations, de contraintes, etc.
  - Variables de caractérisation physique : masse volumique, viscosité, coefficients d'échange, chaleur latente, module d'Young, limite élastique, à la rupture, (toute propriété intrinsèque à un milieu caractérisée par une grandeur), etc.
  - Variables adimensionnées : nombre de Reynolds, etc.

[4] On peut trouver notamment dans l'ouvrage de Ashby [Ashby, 2000], une méthodologie systématique de choix des matériaux, basée sur des variables agrégées de ce type.

- Variables d'aspect ou de description : forme, couleur, etc.
- Variables d'estime : coût, valeur, satisfaction, variable associée à une sensation (l'accroche à la neige pour un ski par exemple [Doré et al., 2003]), etc.
- Variables symboliques : références d'un catalogue de composants, de matériaux, etc.

2 - III.2.2 Modèles de description physique en conception

Il est souvent difficile de proposer directement un modèle global d'un produit à concevoir. Il est courant, en conception, de représenter le système à concevoir comme un ensemble ou une combinaison d'éléments constitutifs souvent appelés composants. Cette vision du système nous amène à distinguer plusieurs éléments de la modélisation, dont deux types de modèles de comportement que nous nommons **modèles de composants (MC)** et **modèles d'interaction (MI)**.

a. Modèles de comportement d'un composant (MC)

À notre sens, un modèle de comportement est associé à un composant ou plutôt à un bloc fonctionnel[5] (une unité de production de vide, un moteur, une vis, etc.). Ce type de modèle relie généralement des variables de conception, critères et intermédiaires qui sont propres au composant ainsi que des variables intermédiaires propres aux milieux et aux composants extérieurs exerçant une influence sur lui. Le modèle de composant permet donc de décrire la manière dont réagit le bloc fonctionnel face à des sollicitations extérieures, qui peuvent être dues à des éléments extérieurs au système, ou propres au système mais extérieures au composant. La définition d'un composant suppose donc la définition de limites et de conditions aux limites à ses interfaces (*cf.* figure 2-4).

b. Modèles d'interaction entre composants (MI)

Les modèles d'interaction permettent de décrire les relations apparaissant aux interfaces de plusieurs composants ou blocs fonctionnels. Ils relient donc les modèles de composant entre eux par les conditions aux limites qui apparaissent à leurs interfaces (*cf.* figure 2-4). Les modèles d'interaction décrivent les influences des composants les uns sur les autres et l'influence du comportement d'un milieu extérieur sur les composants du système (par exemple, un liquide de refroidissement).

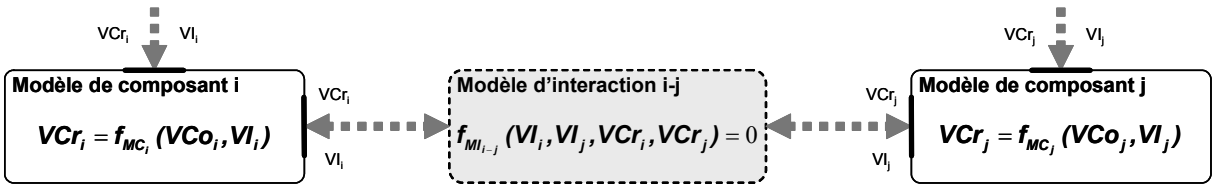


Figure 2-4 : Liens entre modèles de composant et modèles d'interaction

[5] Nous utiliserons abusivement le mot de composant plutôt que le terme de bloc fonctionnel qui a priori est plus général (il ne fait pas intervenir de concept) et mieux adapté, mais les expressions composant et modèle de composant nous semblent plus explicites.

Les modèles d'interaction définissent :

- Les liaisons mécaniques :
  - flux d'énergie mécanique (transfert d'effort, propagation acoustique, etc.)
- Les liaisons fluidiques qui concernent les variables d'état (**T**, **P**, **C**) :
  - flux d'énergie thermique
  - flux d'énergie mécanique
  - flux de matière
- Les liaisons électriques, magnétiques,
- Les flux d'information, etc.

Les interfaces entre blocs fonctionnels peuvent être matérialisées par des composants d'interface, dans ce cas, les modèles d'interaction décrivent le comportement de ces composants d'interaction :

- Éléments de liaison mécaniques, éléments de structure :
  - Boulons, vis, colle, etc.
  - Arbres, etc.
- Éléments de liaison fluidiques :
  - Conduites (tubes, coudes, réductions), etc.
- Éléments de liaison électriques et magnétiques :
  - Fils, câbles, connexions, etc.
  - Fibres optiques, etc.
- Éléments de liaison d'information.

Les modèles de composant et d'interaction peuvent donc faire intervenir différents types de relations ou d'équations parmi les suivantes :

- des modèles de type structural, des lois de conservation :
  - conservation de l'énergie (principes thermodynamiques, conservation de la chaleur, énergie mécanique, énergie de déformation, etc.),
  - conservation de la quantité de mouvement (principe fondamental de la dynamique, de la statique, équations de Navier-Stokes, etc.),
  - conservation de la masse,
  - conservation de charges électriques,
  - lois de propagation, etc.
- des modèles spécifiques (souvent des lois phénoménologiques) :
  - des lois de comportement (déformation, rhéologie, etc.),
  - des modèles de transfert (lois de Fick, de Fourier, de Newton, etc.),
  - des modèles de contact, de frottements (loi de Coulomb, de Hertz, etc.),
  - dissipations, relaxations de contraintes, etc.
  - interactions électromagnétiques, etc.
  - modèles stochastiques (fatigue, fissuration, etc.).

Nous verrons, lors de l'analyse organique d'un système, que l'ensemble des modèles de composants et des modèles d'interaction à un niveau systémique donné, constitue le modèle de composant au niveau systémique directement supérieur.

Nous distinguons deux types de modèles :

- **Les modèles de composant (MC) décrivent le comportement d'un composant face aux sollicitations extérieures ; ils relient les variables de conception aux variables critères du composant.**
- **Les modèles d'interaction (MI) assurent les couplages entre les composants et lient entre elles les variables de sortie et d'entrée de différents composants.**

Il est nécessaire de proposer une démarche aidant à l'identification exhaustive des phénomènes physiques susceptibles d'intervenir dans la modélisation du comportement d'un système à concevoir, et surtout, des différents modèles de composant et d'interaction à formaliser en vue d'aider au choix d'une architecture, des composants, de leurs dimensions pour répondre à un problème de conception. Cette démarche est présentée dans la section suivante.

Nous montrons dans la suite du document (*cf.* § 2 - IV) comment déterminer et distinguer les variables de conception, les variables critères, les variables intermédiaires, ainsi que les modèles de composant et les modèles d'interaction à définir. Pour ce faire, nous nous appuyons sur une décomposition fonctionnelle du système à modéliser.

Il sera nécessaire ensuite de qualifier :

- la décomposition proposée du système en modèles de composant et d'interaction,
- chaque modèle formalisé (composant et interaction),
- chaque modèle obtenu dans le contexte global (*i.e.* en relation avec les autres),
- le modèle global obtenu constitué de l'ensemble des modèles de composant et d'interaction formalisés.

2 - IV ANALYSE D'UN PROBLÈME DE MODÉLISATION EN CONCEPTION

Face à la complexité des problèmes de conception, les concepteurs ont progressivement proposé des outils permettant de réduire cette complexité afin de pouvoir répondre aux besoins qui leur étaient présentés. La plupart des solutions trouvées face à cette complexité ont consisté à décomposer le problème de conception en sous-problèmes plus simples. L'analyse fonctionnelle, et les différents outils afférents, est une démarche d'analyse qui participe à cette vision d'un problème de conception.

2 - IV.1 Analyse du problème de conception

La démarche que nous cherchons à mettre en œuvre doit fournir au concepteur une aide pour formaliser des modèles physiques adaptés à l'évaluation des performances des différents concepts (architectures et composants). Parmi les outils de représentation de l'analyse de la valeur, nous nous proposons d'utiliser : l'Organigramme Technique (OT) [Nadeau, 2003] et le Bloc Diagramme Fonctionnel (BDF) [AFNOR, 1991, AFNOR, 1996]. Ces outils sont décrits dans les approches organique et physique [Scaravetti, 2004] afin d'aider à la structuration d'un problème de conception.

L'emploi de ces outils en vue de la formalisation d'un modèle de comportement pour le système nous conduit à identifier un certains nombres d'éléments structurants de la phase de formalisation de modèles, et notamment les deux types de modèles de comportement : **des modèles de composants** et **des modèles d'interaction**.

Nous prenons comme point de départ les **hypothèses** suivantes résultant des phases initiales de la conception ; sont connus : le cahier des charges fonctionnel du système, un ou des principes de solutions pour l'architecture du système, pour les blocs fonctionnels et pour les composants.

2 - IV.2 Organigramme technique (OT)

2 - IV.2.1 Description

L'OT est un outil de représentation qui permet de décrire le système sous la forme d'une architecture et de composants. Chaque bloc fonctionnel – c'est-à-dire, un sous-ensemble du système qui assure une fonction, et qui est lui-même constitué de sous-éléments – apparaît à un niveau et peut être décomposé en sous-éléments.

Ainsi, lorsque le système considéré est un système existant, l'OT est un outil descriptif et permet de le décomposer en éléments plus simples de manière structurée. À chaque bloc fonctionnel représenté correspond alors un composant matériel existant (ce composant peut également matérialiser à lui seul plusieurs fonctions). Dans ce cas, le bloc fonctionnel est défini par le nom du composant qu'il symbolise (par ex. : pompe à vide).

Si au contraire le système est en cours de conception, il peut ne pas être complètement défini. Cependant, lorsqu'une architecture de solution et des solutions de concepts pour les composants ont pu être définies, on peut tout de même représenter l'architecture du système par l'intermédiaire d'un organigramme technique (*cf.* figure 2-5). Selon l'avancement du projet, on visualise le système jusqu'à des niveaux plus ou moins bas. De manière générale, en conception préliminaire, seuls les premiers niveaux (ensembles) interviennent dans l'OT. Les blocs fonctionnels sont alors généralement décrits par la fonction qu'ils réalisent (par ex. : unité de vide, qui ne présume pas de la solution à adopter).

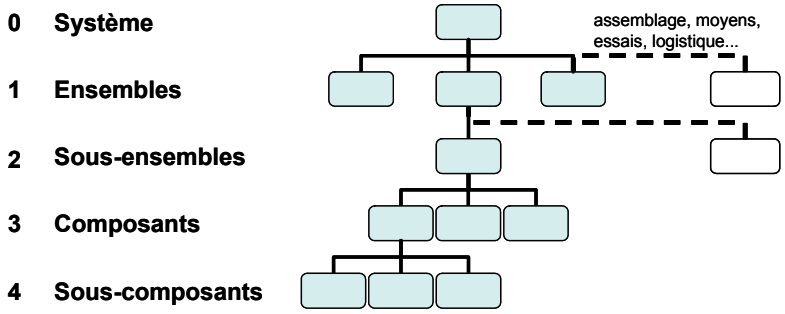


Figure 2-5 : Organigramme technique et niveaux systémiques

L'OT peut être utilisé comme un outil de gestion de projet, puisqu'on peut le voir comme la décomposition du système en sous-problèmes pouvant être traités distinctement. Il permet donc de mettre en regard des blocs fonctionnels des moyens : d'assemblage, de fabrication, d'essais, de logistique, etc.

Pour notre part, nous l'adaptons afin de l'utiliser comme un outil d'aide à l'identification des modèles de composants et de leurs interfaces. Étant donné qu'il permet de discerner les sous-ensembles à concevoir du système, il révèle en particulier les interfaces entre ces sous-ensembles et par conséquent, les premières contraintes d'interface peuvent être détectées : les contraintes de compatibilités et d'assemblage qui apparaissent lorsqu'il faut associer les blocs identifiés pour constituer le système. Ces contraintes d'interface peuvent être d'ordre mécanique, informatique, électromagnétique, thermique, chimique (etc), elles sont listées dans les approches normalisées de la conception [Cavaillès, 1995].

2 - IV.2.2 Intérêt pour la modélisation

Du point de vue de la modélisation, l'OT offre donc déjà, par l'intermédiaire des grands blocs identifiés et des contraintes de compatibilité, le moyen de préciser quels sont les différents modèles à faire intervenir aux premiers niveaux de décomposition, ainsi que les premières interactions à prendre en compte. Ainsi, selon l'état des connaissances, pour chaque bloc fonctionnel, on peut proposer un **modèle de comportement**, à partir de modèles existants, issus soit de la culture de l'entreprise, soit d'une recherche dans des bases de données de modèles existants. On a également identifié des **contraintes d'interface** entre blocs, éventuellement des conditions aux limites pour les composants associées à ces contraintes, mais pas les modèles d'interaction, qui traduisent les contraintes d'interface des composants et leurs couplages.

2 - IV.2.3 Éléments standard, éléments non-définis

L'OT permet en outre de faire apparaître la distinction entre les éléments à concevoir, les éléments standard et les éléments standard à dimensionner (*cf.* tableau 2-2).

Le choix de recourir ou non à un élément standard provient de l'évaluation conjointe du coût, du risque de conception, éventuellement de l'existence d'éléments standard sur catalogue (composants de grandes séries). Ce sont des composants ou des blocs fonctionnels entiers qui font généralement l'objet de réutilisations ou alors dont la conception est bien maîtrisée au sein d'une entreprise fournisseur. Certains éléments standard n'offrent pas d'alternatives autres que le choix de conception lié à l'élément lui-même, en revanche d'autres, que nous avons dénommés standard à dimensionner, laissent des choix de conception – comme certaines de leurs dimensions – libres. Enfin, si la phase d'analyse et de structuration du problème a montré que l'élément (ensemble, composant, etc.) était structurant, cela indique que le composant intervient dans la réalisation d'une fonction de conception à risque, c'est un composant à forte valeur ajoutée qui nécessite souvent d'être entièrement conçu, nous les nommons composants non définis.

À chaque élément apparaissant dans l'OT peut donc correspondre l'écriture d'au moins un modèle de composant (ou ensemble, ou sous-composant, selon le niveau). On peut également lui associer plusieurs variables. Il existe cependant des différences selon que le composant est conçu totalement ou choisi comme standard. Ainsi, pour la formalisation du modèle de composant, les composants standard et standard à dimensionner imposent généralement :

- le choix des variables de conception (VCo) (*cf.* § 2 - III.2.1b) définissant le composant, ainsi que les domaines de variation de ces variables ; certaines ont des valeurs imposées, donc à choisir parmi un ensemble continu ou discret de valeurs possibles imposées par le constructeur sous forme de catalogues, d'autres ont des valeurs libres, c'est-à-dire à déterminer par le dimensionnement, ces valeurs sont tout de même bornées généralement par le cahier des charges ou l'expertise du concepteur.
- les critères de choix qui font intervenir des variables – que l'on nomme variables critères (VCr) – évaluant les performances du composant et permettant d'effectuer un choix entre différentes configurations (ou références) du composant.
- les relations entre VCo et VCr, constituent le modèle de comportement du composant et sont le plus souvent fournies et déterminées expérimentalement par le fournisseur.

Tableau 2-2 : Exemples d'éléments standard, d'éléments non définis et leurs variables de conception

Éléments	Exemples	Variables de conception
Composant standard	Ventilateur	réf. catalogue de ventilateur
Composant standard à dimensionner	Filtre	réf. catalogue de filtre + dimensions
Composant à concevoir	Bloc électrique de batterie	à définir

En revanche, les composants non définis laissent le choix des variables de conception et critères au choix et au savoir-faire du concepteur, de même que l'écriture des relations de comportement. Ils nécessiteront donc une interrogation sur les variables et le modèle à employer à laquelle nous tentons de répondre par la suite. On peut ainsi consigner sur l'OT (*cf.* figure 2-6) les éléments qui seront choisis à partir de catalogues constructeurs ; en terme de modélisation, ces éléments demanderont généralement moins d'efforts.

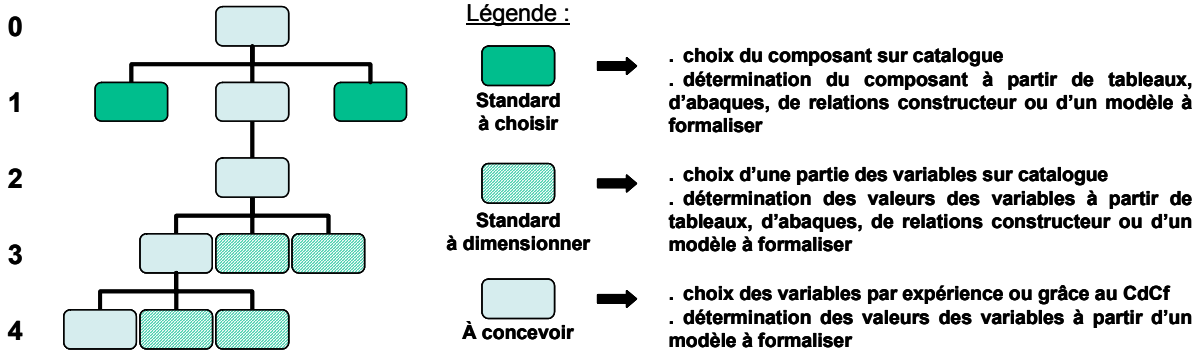


Figure 2-6 : Identification à partir de l'OT des composants standard et non-définis

---

L'organigramme technique aide à l'identification :

- **des modèles de composants aux premiers niveaux systémiques,**
- **des contraintes d'interfaces entre les composants, qui peuvent imposer certaines conditions aux limites,**
- **des composants standard, standard à dimensionner et à concevoir qui permettent de spécifier certaines VCo et VCr.**

---

2 - IV.3 Critique de l'organigramme technique

Si l'OT permet d'identifier les modèles de composant et les contraintes d'interface, il ne donne pas la possibilité de faire figurer les éléments extérieurs au système qui ont parfois une influence non négligeable sur son comportement, ni de discerner les modèles d'interaction entre composants.

2 - IV.3.1 Milieux extérieurs

Nous suggérons donc de faire apparaître également dans l'OT, les milieux extérieurs au système étudié. De la même manière que les éléments du système, les milieux extérieurs peuvent apparaître à différents niveaux et l'on peut aussi associer à chaque milieu extérieur des variables les caractérisant (le plus souvent des variables d'état ou de caractérisation physique, *cf.* § 2 - III.2.1) et éventuellement un modèle de comportement pour ce milieu.

Exemples de modèles de milieu extérieur :

- Loi de puissance d'un appareil imposé
- Loi d'atmosphère (*i.e.* relation température, pression, altitude)

La figure 2-7 montre l'exemple d'un OT limité aux deux premiers niveaux systémiques d'un système (représentation réalisée à l'aide du logiciel MAL'IN® [MAL'IN, 2003]). Il est complété par le milieu extérieur qui interagit avec le système. L'organigramme technique ainsi complété, est nommé **organigramme technique étendu** (OTe).

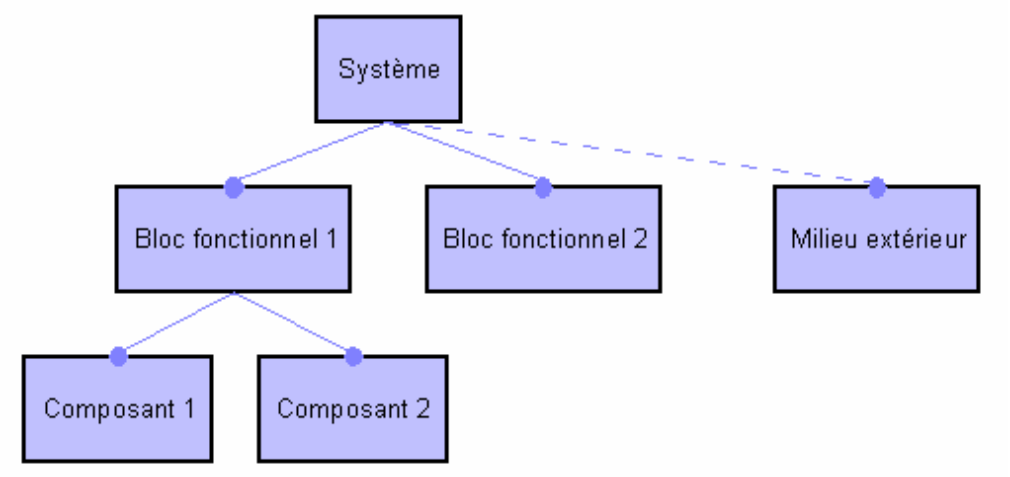


Figure 2-7 : Organigramme technique étendu : organigramme technique complété par les milieux extérieurs (lignes en pointillés)

L'organigramme technique étendu (OTe) complète l'OT par les milieux extérieurs qui interagissent avec le système à tous les niveaux. Ces milieux extérieurs font intervenir des modèles de comportement et de nouvelles contraintes d'interface avec le système.

2 - IV.3.2 Conclusion

À ce stade, l'OTe a permis de mettre en évidence les modèles de composant à mettre en œuvre, les interfaces qui devront être prises en compte entre certains composants, les milieux extérieurs qui interviennent dans l'écriture du modèle, et enfin, certaines VCo et VCr et certains modèles imposés par le choix de composants parmi des composants standard.

En revanche, l'OTe est insuffisant pour les blocs fonctionnels pour lesquels il n'est pas possible à ce stade de fournir un modèle de composant, ou qui ne font pas apparaître les variables de conception de certains composants structurants. Il est donc utile d'examiner les constituants de niveaux inférieurs pour préciser le comportement. En outre, les interactions entre les blocs fonctionnels n'ont pas été explicitées par l'OTe. Nous proposons d'utiliser à cette fin les blocs diagrammes fonctionnels.

2 - IV.4 Blocs diagrammes fonctionnels (BDF)

2 - IV.4.1 Description

Le BDF consiste à représenter le cheminement des flux fonctionnels au travers de l'élément considéré. Il peut être réalisé pour le système pris dans sa globalité, ou seulement pour un bloc fonctionnel. Quel que soit le niveau de représentation choisi, cela consiste à faire apparaître les composants du niveau immédiatement inférieur au bloc examiné (éventuellement grâce à l'OTe), puis à faire figurer les flux fonctionnels (donc associés à une fonction) parcourant l'élément.

Un BDF est réalisé pour **chaque situation de vie et pour chaque solution d'un même bloc fonctionnel** qu'on souhaite évaluer, puisque chacune d'entre elles peut combiner des fonctionnalités et des composants différents.

On peut également remarquer que l'écriture d'un BDF ne fait intervenir que le niveau d'éléments de l'OTe directement inférieur à l'élément considéré. Une représentation plus fine, faisant apparaître des éléments de niveaux inférieurs tels que des sous-composants, nécessite donc la définition d'alternatives de conception pour les composants de niveaux inférieurs, si ce n'est déjà fait. Ceci signifie que pour être exhaustif dans la description du système, il est nécessaire de réaliser autant de graphes que de solutions de conception possibles qui représenteront donc autant de modèles.

Chaque fonction du produit, recensée lors de la rédaction du cahier des charges fonctionnel, se traduit par le transit d'un flux fonctionnel au travers des divers éléments du système. Le BDF d'un bloc fonctionnel met en évidence les interactions entre les éléments du bloc par l'intermédiaire des flux fonctionnels transitant entre les différents éléments du produit. Ces flux peuvent également faire intervenir les milieux extérieurs au bloc fonctionnel. Les BDF permettent par conséquent de mettre en évidence : les interactions entre les composants et les milieux extérieurs, les interactions entre les composants eux-mêmes, la circulation des flux à travers ou à l'intérieur du produit.

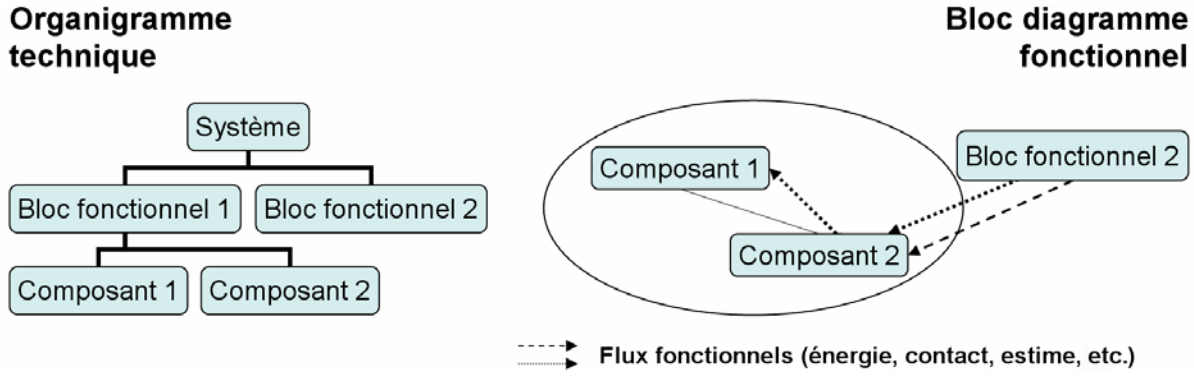


Figure 2-8 : Organigramme technique et bloc diagramme fonctionnel du bloc fonctionnel 1

Les flux fonctionnels peuvent être des flux d'estime (faisant intervenir un jugement de valeur de la part de l'utilisateur), de contact, de matière ou d'énergie. Le BDF est un outil de conception puisqu'il permet, le cas échéant, d'identifier les composants inutiles, de simplifier ou d'optimiser les flux fonctionnels

[Yannou, 1998] ; néanmoins, dans notre cas, il nous sert surtout d'outil pour identifier les modèles à écrire afin de décrire les interactions entre les composants.

2 - IV.4.2 Intérêt pour la modélisation

Le BDF fait donc intervenir les composants des niveaux inférieurs ainsi que le cheminement des flux fonctionnels, il permet ainsi de discerner plus clairement les phénomènes physiques qui interviennent dans la conception du système, que ce soient des phénomènes liés aux interactions entre composants qui sont représentés par les flux eux-mêmes ou que ce soient des phénomènes liés au comportement des composants.

Ainsi, à chaque flux fonctionnel représenté sur un BDF peut correspondre l'écriture d'un **modèle d'interaction** physique sous la forme de bilans de conservation ou autres. Étant donné que plusieurs flux peuvent traverser un même composant, il faut étudier quelle est l'influence de ce composant pour chaque flux. [Tassinari, 2003] distingue dans l'écriture d'un BDF différents types d'éléments, selon qu'ils transforment (générateur, transformateur) les flux fonctionnels qui les traversent ou selon qu'ils les transmettent uniquement (récepteur, transmetteur). Ce type de questionnement est utile afin de savoir si un modèle de composant va intervenir ou non dans l'écriture du modèle d'interaction décrivant un flux fonctionnel. Un composant laissant transiter un flux fonctionnel sans le modifier ne demande pas l'écriture d'un modèle de comportement lié à ce flux (du point de vue de la conception, ce composant est peut-être superflu), dans le cas contraire il est nécessaire d'écrire un modèle de comportement rendant compte de l'influence du composant sur ce flux ou inversement de l'incidence du flux sur le composant. Dans la plupart des cas, les **composants d'interactions** (boulons, conduites, etc.) peuvent être définis comme des composants transmettant les flux fonctionnels avec des pertes minimes, voire négligeables, il n'y a pas de transformation d'énergie dans un composant d'interaction.

L'exemple de la figure 2-8 représente le BDF du bloc fonctionnel 1, il fait apparaître un flux de contact et deux flux fonctionnels. Cette représentation permet donc d'identifier au moins un modèle d'interaction pour chaque flux fonctionnel[6], ainsi qu'un modèle de composant, pour chaque composant traversé par un flux sur lequel il a une influence. Dans le cas où l'on est incapable de formaliser un modèle pour un composant, on peut réitérer cette démarche pour le composant : écrire le BDF avec les éléments de niveau inférieur et les milieux extérieurs, qui peuvent être des éléments propres au système mais externe à l'élément considéré, et de niveau systémique différent.

[6] **Remarque :** nous traitons dans ce document des flux fonctionnels induits par des phénomènes physiques, les flux d'estime sont liés à un traitement particulier, notamment à la perception qu'a l'utilisateur final du produit. Ils font l'objet d'une thèse en cours réalisée par Raphaëlle Doré [Doré et al., 2003].

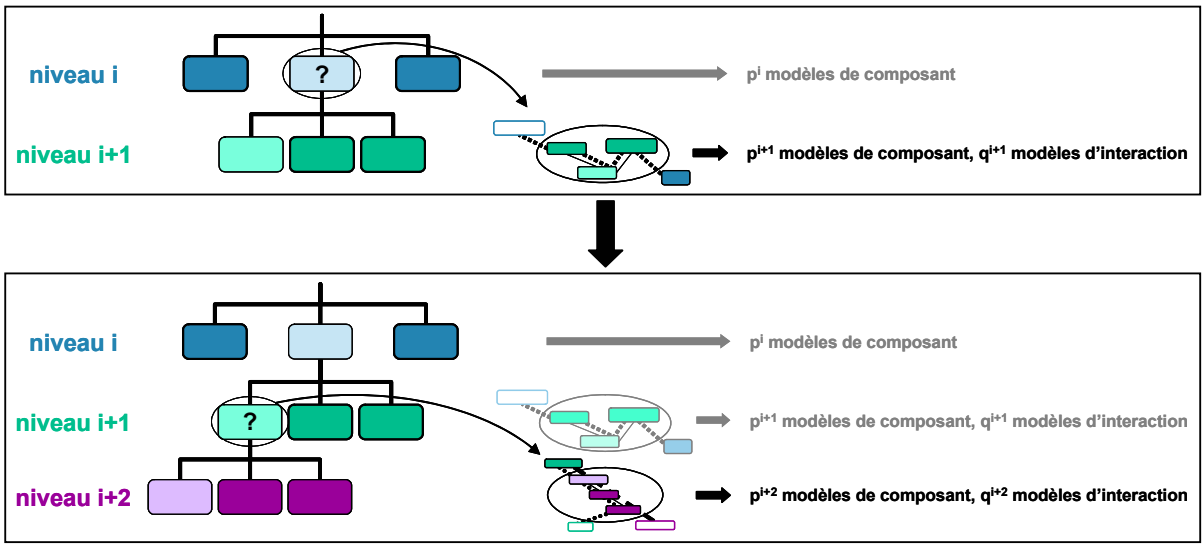


Figure 2-9 : Logique de décomposition à l'aide de l'OTe et des BDF

On aboutit ainsi à une représentation du système à l'aide d'une logique du type fractale (*cf.* figure 2-9) : à chaque fois que l'on se trouve en présence d'un élément qu'on est incapable de modéliser, on écrit son BDF en passant à une description du niveau inférieur et on retrouve le même type de représentation qu'au niveau précédent. On peut en effet remarquer qu'à l'aide de la représentation par BDF, on montre selon ce point de vue de représentation, qu'un modèle de comportement n'est qu'un modèle constitué de plusieurs modèles de comportement et de modèles d'interaction.

- **Les blocs diagrammes fonctionnels présentent le cheminement des flux fonctionnels au sein du système et de chaque composant.**
- **Les BDF permettent d'associer à chaque flux fonctionnel un modèle d'interaction qui traduit les couplages entre les différents composants traversés par le flux.**
- **Chaque modèle de bloc fonctionnel peut être décrit à l'aide de MC et de MI du niveau systémique inférieur en écrivant son BDF, ce qui permet d'enrichir la représentation de l'OTe, ainsi que le modèle global du système.**

2 - IV.5 Critique des BDF : extension aux graphes d'association substances-champs

On peut faire quelques remarques critiques sur ce qui a été présenté précédemment. Notamment, la représentation à l'aide des BDF présente l'inconvénient de ne pas faire intervenir les éventuels couplages physiques entre les flux. De même, les phénomènes physiques qui n'apparaissent pas comme des flux fonctionnels, mais doivent être pris en compte pour la modélisation, parce qu'ils sont non négligeables pour les choix de conception, ne sont pas identifiés par les BDF. Par exemple, les phénomènes physiques induits et non souhaités sur le plan fonctionnel (dilatations, etc.) ne sont pas nécessairement mis en évidence grâce aux BDF.

Nous proposons une version critique du BDF, basée sur les graphes d'association substances-champs (GSC) issus de la théorie TRIZ. L'intérêt est que l'on peut s'aider de ces graphes d'association pour analyser de manière exhaustive les éléments (substances[7]) et les phénomènes physiques (champs[8]), et qu'ils font apparaître les éventuelles interactions qui se produisent entre les substances (associations[9]). L'utilisation de verbes d'action pour exprimer l'influence d'une substance sur l'autre permet d'identifier rapidement quels types d'effets physiques sont en jeu. Ce type de graphes permet d'obtenir le même type de représentation qu'un BDF mais avec un niveau de détail généralement plus important.

TRIZ est une méthode systématique d'innovation qui se veut exhaustive. Elle s'appuie, parmi de nombreux autres outils, sur une base de données très complète de paramètres de conception et d'effets physiques qui permet une recherche systématique de ces éléments. La syntaxe de représentation des graphes substances-champs impose que les flux fonctionnels soient associés à des verbes d'action qualifiant l'action d'un élément sur l'autre. Des travaux de recherche menés au sein du groupe ont permis d'associer de manière systématique à ces verbes d'actions, des paramètres pertinents, générant ou transformant le flux associé. Cette représentation permet d'identifier en sus des flux fonctionnels associés à des phénomènes physiques, les effets induits et les éventuels couplages entre flux. Ces recherches ont été concrétisées par la création du logiciel d'aide à l'innovation MAL'IN® [MAL'IN, 2003]. On a consigné en annexe 1, une partie des outils associés à la construction des GSC dans MAL'IN®, permettant d'aboutir à une représentation exhaustive des couplages existant entre les composants.

La figure 2-10 reprend l'exemple donné en figure 2-8 du système de la figure 2-7. Elle montre que les GSC peuvent enrichir la représentation par les BDF du cheminement des flux fonctionnels.

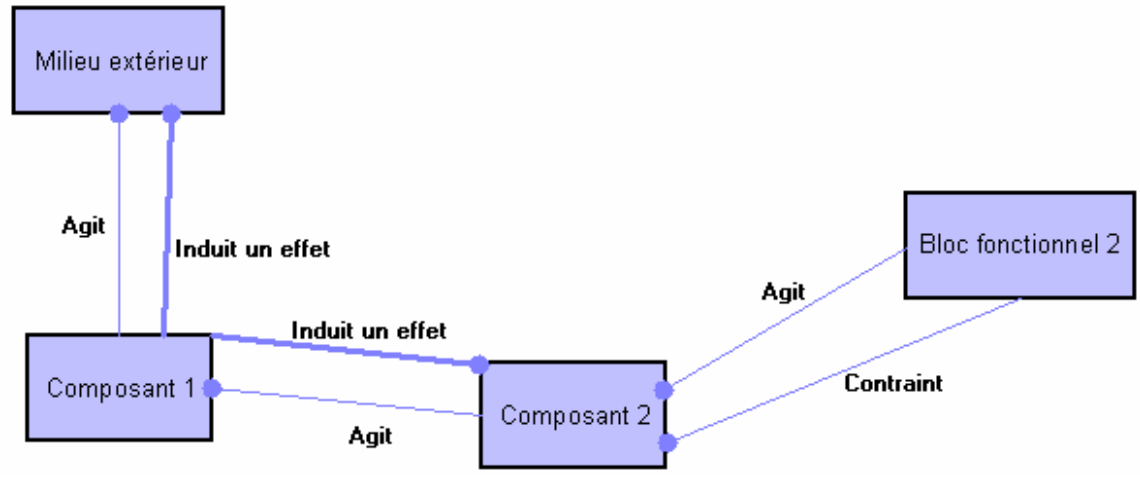


Figure 2-10 : Graphe d'association substances-champs du système représenté par l'OTe de la figure 2-7, la représentation fait apparaître les effets induits

[7] Une substance est définie comme un élément à masse non nulle et/ou volume non nul, le vide étant donc une substance.

[8] Un champ est défini comme un effet physique réalisant une action.

[9] Une association est définie comme la combinaison de deux substances reliées par un champ : une substance émettrice d'un champ et une substance réceptrice.

Cette analyse permet de proposer, depuis l'analyse fonctionnelle jusqu'à la représentation des graphes substances-champs, une méthode cohérente donnant la possibilité de lister de manière exhaustive les couplages entre les composants à faire apparaître dans le modèle : les effets utiles (également identifiés à l'aide des BDF), insuffisants, nuisibles et également les effets induits.

L'utilisation des graphes d'association substances-champs (GSC) permet de compléter l'analyse des couplages des composants du système. Le GSC enrichit les BDF par l'identification des effets nuisibles et induits des couplages, le concepteur choisit alors d'en tenir compte ou non.

2 - IV.6 Synthèse de l'approche méthodologique

2 - IV.6.1 Récapitulation des différents types de modèles et variables associées

Un modèle à un niveau systémique donné comporte :

1. **Deux types de modèles de composants :**
   - **modèle de comportement d'un composant ou d'un bloc fonctionnel**

   Ces modèles décrivent le comportement physique des composants standard ou à concevoir.
   - **modèle de comportement d'un milieu extérieur**

   Ces modèles décrivent le comportement des milieux extérieurs. Il définit le comportement figé des milieux extérieurs, il ne comprend que des variables intermédiaires.
2. **Des modèles d'interaction :**

   Ils concernent les modèles de liaison avec les milieux extérieurs (ou blocs fonctionnels) et entre les composants. Les modèles d'interaction sont issus de l'analyse des couplages des blocs diagrammes fonctionnels et des graphes d'association substances-champs qui permettent d'identifier tous les couplages et donc les relations à écrire dans les modèles d'interaction. Un modèle d'interaction permet de lier les variables de sortie et d'entrée des blocs fonctionnels concernés.
3. **Les variables des modèles sont :**
   - **Des variables de conception (VCo), qui :**
     - définissent le composant,
     - ont des valeurs libres à déterminer par le dimensionnement,
     - sont choisies parmi un ensemble continu ou discret de valeurs possibles imposées par le constructeur, parfois sous forme de catalogues.
   - **Des variables critères (VCr), qui sont :**
     - des critères d'appréciation du CdCF,
     - des indicateurs de la pertinence de la conception (règles métiers, fonctions d'optimisation).
   - **Des variables intermédiaires (VI), qui :**
     - permettent la définition de certaines VCo,
     - participent à la cohérence des modèles et à la définition des VCr.

2 - IV.6.2 Récapitulation des différents outils d'analyse utilisés

Au final, les quatre approches exposées précédemment issues d'outils d'analyse fonctionnelle et d'outils TRIZ, permettent de converger vers une représentation exhaustive du système dans l'espace de modélisation.

Elles mènent successivement à la distinction des modèles de comportement et des variables à exprimer pour la conception préliminaire : les modèles d'interaction, les modèles et les variables de composants standard, les modèles et les variables liés aux milieux extérieurs, les modèles de composant non définis (*cf.* figure 2-11).

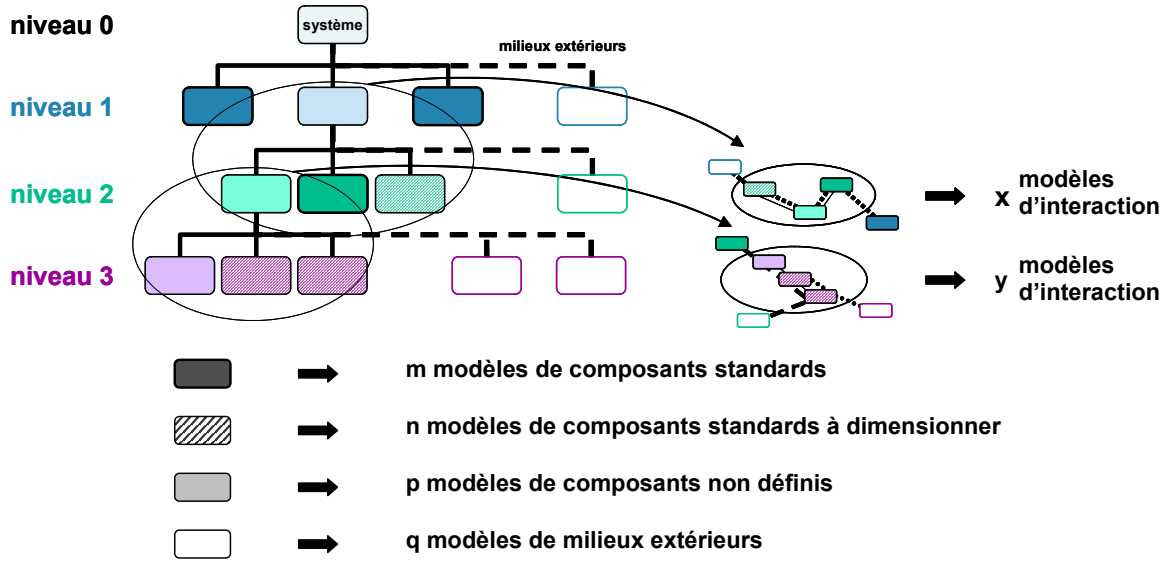


Figure 2-11 : Synthèse de l'analyse préalable à la modélisation

Le fait d'analyser le système au travers de l'OTe, des BDF et des GSC permet d'enrichir progressivement les niveaux de description de l'OT et d'aboutir à une vision claire de la formalisation minimale du modèle de comportement du système à concevoir. Le choix du niveau où il faut s'arrêter dans une branche dépend conjointement de la connaissance des éléments structurants de la conception et de la connaissance disponible d'un modèle.

La formalisation de l'OTe et des BDF permet d'être exhaustif et d'inventorier – à partir du cahier des charges fonctionnels et de la recherche de concepts – tous les modèles de composant et d'interaction pouvant intervenir dans la modélisation du comportement du système, sans pour autant influencer les choix de conception. Au travers de ces graphes de représentation, il est possible de modéliser le système global par une structure composée d'éléments, qui, selon le niveau systémique auquel on se place, fait apparaître chacun des blocs fonctionnels, chaque composant, ou chaque sous-composant, qui interagissent entre eux ou avec des milieux extérieurs.

L'utilisation conjointe des représentations du système par l'intermédiaire du GSC et de l'OTe permet de mettre en évidence quels sont les modèles à formaliser en vue de l'évaluation d'une solution de conception (concept d'architecture et éléments dimensionnés). Nous avons identifié qu'ils permettaient de

mettre en évidence deux types de modèles élémentaires : **des modèles d'interaction** et **des modèles de composants**.

Cette phase constitue donc le niveau minimum de description à assurer en cohérence avec les caractéristiques pertinentes ou structurantes de la conception dégagées par l'intermédiaire de la méthode de DS [Scaravetti et al., 2003]. La phase d'analyse et de structuration pour la modélisation permet donc de répondre à la question suivante : que faut-il modéliser au minimum pour aider le concepteur à faire des choix de conception entre différentes configurations ? Le modèle global du système à concevoir est constitué de l'ensemble des modèles identifiés dans cette phase. Nous nommons désormais modèles locaux les modèles de composant et d'interaction, par opposition au modèle global, qui signifie le modèle complet du système à concevoir.

2 - V FORMALISATION DES MODÈLES DE COMPOSANTS ET DES MODÈLES D'INTERACTIONS (PHASE DE MODÉLISATION)

La décomposition faite à l'aide des outils d'analyse fonctionnelle (OTe, BDF, etc.) a permis d'identifier quels sont les éléments structurants de la conception qui doivent participer au modèle du système à concevoir, il reste à identifier les éléments structurants de la physique. La formalisation de chaque modèle local suivra le schéma que nous avons décrit précédemment, à savoir, hypothèses, réalisation, qualification. Nous apportons cependant quelques précisions par rapport aux points présentés au § 2 - II.2 au vu des nouveaux éléments impliqués par la décomposition fonctionnelle. L'étape de modélisation permet de formaliser un premier modèle pour chaque élément considéré en suivant le schéma présenté.

2 - V.1 Formalisation des modèles de composants

On considère chaque bloc fonctionnel (composant ou milieu extérieur) pour proposer un modèle de comportement pour les flux identifiés qui les traversent et qu'ils transforment. Les éléments de l'OTe sont considérés un à un en commençant par les niveaux systémiques les plus élevés puis en finissant par les niveaux systémiques les plus bas.

2 - V.1.1 Hypothèses

L'étape de réalisation d'hypothèses pour la phase de modélisation implique pour chaque modèle de composant considéré :

a. le choix d'un niveau de modélisation initiale,
b. l'établissement d'hypothèses de modélisation, définissant le cadre de travail et de validité du modèle.

a. Choix d'un niveau de modélisation initiale

Le choix du niveau de modélisation à mettre en œuvre est une hypothèse fondamentale qui conditionne l'écriture du modèle.

Ce choix va être guidé par :

- la phase d'analyse préalable (*cf.* section précédente) qui a déterminé les limites du problème de conception considéré. Le niveau minimum de représentation d'un élément du modèle global est donc imposé par le niveau de détail nécessaire identifié par le concepteur : si un composant doit apparaître dans le modèle global (élément structurant du modèle), il faut au moins considérer un modèle initial à l'échelle du composant pour celui-ci. Ainsi, la figure 2-12 montre, pour un composant (grisé) supposé structurant de la conception, quels sont les niveaux de modélisation possibles.

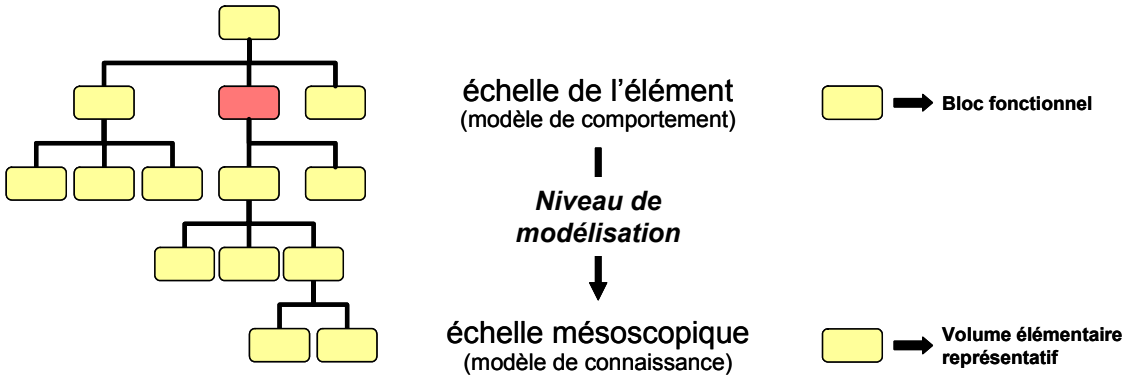


Figure 2-12 : Niveaux de modélisation

- l'état de la connaissance : est-ce qu'un modèle connu existe ou non ? Selon l'état de la connaissance, le concepteur est capable ou non de proposer un modèle à un niveau de représentation donné de l'OTe. Par suite, après le niveau de détail imposé par la décomposition obtenue, c'est la connaissance même d'un modèle qui conditionne le choix du niveau initial de modélisation pour chaque modèle de composant.
- la cohérence du modèle proposé par rapport à l'analyse préalable : est-ce que le modèle fait apparaître les variables nécessaires au choix (variables de conception et variables critères indispensables à la conception), est-ce qu'il est possible d'écrire les modèles d'interaction en cohérence avec le niveau du modèle, est-ce qu'il rend compte du comportement du composant vis-à-vis des flux fonctionnels identifiés le traversant.

Il est nécessaire de remarquer que, si les premiers niveaux systémiques permettent de définir des blocs fonctionnels au sens de l'analyse fonctionnelle, les niveaux les plus bas font plutôt appel à la notion de volume élémentaire représentatif pour définir les frontières (au sens systémique du terme) des blocs.

Le PEPS du modèle va évoluer en fonction du niveau de modélisation choisi, on a pu observer plusieurs mécanismes liés à ce choix :

- D'une manière générale, on peut remarquer que la complexité du modèle initial augmente (la parcimonie diminue) quand on descend dans les niveaux de modélisation, puisqu'il fait appel à un plus grand nombre de composants, ainsi qu'à de nouveaux modèles d'interaction entre ces composants.
- Le modèle risque d'être d'autant plus spécialisé que l'on descend dans les niveaux de représentation, dans la mesure où les éléments constitutifs d'un composant ne sont pas les mêmes selon les concepts de solution retenus (e.g. un échangeur de chaleur à calandre et tubes et un échangeur de

chaleur à plaques matelassées feront intervenir des sous-composants et donc des variables de conception différentes). À l'inverse, la généralisation du modèle est plus importante lorsque l'on remonte dans les niveaux de modélisation, néanmoins, il est plus difficile d'exprimer un modèle de composant au niveau global qui fasse intervenir toutes les variables de conception à dimensionner et qui soit conforme aux objectifs d'exactitude.

- Lorsqu'on se situe à des niveaux très bas (échelle du modèle de connaissance), les modèles qui régissent les phénomènes sont des équations classiques de la physique, par conséquent leur portée est très générale. Il faut cependant nuancer cette remarque, car ce sont des relations généralement très peu parcimonieuses, et qui nécessitent, si l'on souhaite les formaliser de manière parcimonieuse (équation différentielle sous forme intégrée, par exemple), d'émettre des hypothèses fortement spécialisantes (géométrie et conditions aux limites fixées, par exemple).

b. Hypothèses de modélisation

Pour aider à la mise en œuvre d'hypothèses, on peut suivre le processus d'identification présenté au § 2 - II.2.1 en s'aidant de techniques du type analyse de sensibilité, analyse en composantes principales ou analyse des ordres de grandeur pour identifier les phénomènes pertinents.

Les hypothèses sont, de manière classique, liées à des connaissances précises associées à l'objet d'étude ; ces connaissances peuvent être : à caractère technologique (comportements spécifiques associés à une gamme de fonctionnements possibles ou identifiés par les constructeurs, à des domaines d'utilisation ou de validité, etc.), à caractère physique (comportements spécifiques restreints par les phénomènes prépondérants mis en jeu) ou au contexte propre à l'objet d'étude (cahier des charges, environnement direct, géométrie donnée, etc.).

Différents types d'hypothèses peuvent être émises ou définies selon la manière dont elles font évoluer les différents paramètres du PEPS.

- Les hypothèses simplificatrices permettent de réduire les éléments pertinents de l'objet d'étude au détriment de l'exactitude du modèle formalisé, elles consistent généralement à occulter ou à ne considérer qu'une partie de la connaissance qu'on a de l'objet d'étude pour augmenter la parcimonie du modèle formalisé.
- Les hypothèses de spécialisation permettent de déduire d'un comportement donné ou d'une autre hypothèse (géométrie, etc.), une limitation du modèle aux dépens de la généralité du modèle. Ainsi, si les variables restent dans le domaine de validité imposé par une hypothèse de spécialisation, le modèle même adapté, reste exact. La spécialisation contraint donc le domaine d'application du modèle.

Par conséquent, le choix du niveau de modélisation et les hypothèses émises conditionnent la parcimonie, l'exactitude, la précision et la spécialisation initiales pour chaque modèle.

Ces constatations mettent en évidence la difficulté pour le concepteur de devoir trouver un compromis afin d'obtenir un modèle initial à la fois parcimonieux, exact, précis et peu spécialisé. C'est pour-

quoi nous estimons préférable d'utiliser autant que possible des modèles existants et validés à partir de bases de données.

2 - V.1.2 Réalisation

Pour chaque modèle de composant, suivant les hypothèses et au niveau de modélisation définis, un modèle est écrit grâce aux connaissances métiers disponibles. Elles font intervenir, soit les connaissances des concepteurs et la culture de l'entreprise elle-même, soit des bases de données de modèles adaptés au niveau de modélisation choisie.

Nous pensons qu'il faut privilégier, autant que faire se peut, la réutilisation de modèles existants à partir de « bases de données » comme [Roark et Young, 2001], [Kays et London, 1998], [Idel'cik, 1986], ou encore par l'utilisation d'abaques.

Une absence totale de connaissance sur un élément donné de l'organigramme technique oblige a priori à reprendre l'analyse de cet élément à l'aide de l'OTe et des BDF : il faut descendre dans le niveau de modélisation et construire un modèle de comportement à partir des éléments mêmes du composant comme nous l'avons exposé dans la phase de décomposition fonctionnelle.

2 - V.1.3 Qualification

La mise en place d'hypothèses de modélisation et la phase de réalisation de modèles élémentaires permettent l'émergence d'un premier modèle dont la capacité intrinsèque à produire une aide à la décision peut être mesurée. Au travers de l'analyse des quatre critères déjà énoncés, la phase de qualification permet de remettre éventuellement en cause, d'une part, le modèle lui-même, d'autre part, les hypothèses – i.e. les hypothèses et le niveau de modélisation – formulées au préalable.

À ce stade, un modèle peut donc être remis en cause pour plusieurs raisons :

- il manque d'exactitude ou de précision par rapport aux objectifs du concepteur (la connaissance et la précision des VCr sont insuffisantes) ; le modèle ne permet pas une aide à la décision car il ne donne pas un résultat suffisamment fiable pour les attentes du concepteur, ou le modèle n'est pas correct, ou encore, les résultats sont trop imprécis sur la valeur de certaines variables.
- la parcimonie du modèle est insuffisante comparée aux capacités de l'outil de traitement numérique et aux attentes définies préalablement à la modélisation.
- le modèle est trop spécialisé vis-à-vis de l'état d'avancement de la conception.

Ou,

- le niveau de modélisation n'est pas suffisamment détaillé pour faire apparaître toutes les variables nécessaires au dimensionnement à ce stade de la conception (VCo, VCr).
- le coût de mise en œuvre du modèle est jugé trop important.

Dans ce cas, il faut revenir à la première étape de la phase de modélisation et proposer soit un autre niveau de représentation, soit un nouveau modèle ou revenir sur les hypothèses définies.

2 - V.2 Formalisation des modèles d'interaction

Les interactions entre les éléments fonctionnels du système sont des éléments constitutifs du système qui se situent aux interfaces fonctionnelles[10], ces interactions peuvent être matérielles ou non, dans tous les cas elles se traduisent par le cheminement d'un flux (fonctionnel ou non) entre les éléments. On distingue deux types d'interactions : les interactions identifiées par l'intermédiaire des flux fonctionnels structurants et les interactions non-structurantes de la conception identifiées à l'aide des graphes substances-champs. La formalisation des modèles d'interaction, qu'elles soient structurantes ou non, suit le schéma hypothèses, réalisation, qualification.

Comme on l'a vu précédemment, la construction des BDF permet d'identifier les interactions structurantes entre les blocs fonctionnels à un niveau systémique donné, chaque **flux fonctionnel** identifié induit nécessairement la formalisation d'un modèle d'interaction structurante de la conception et des modèles de composants pour chaque composant traversé et modifiant ce flux.

Il existe également des interactions non voulues, voire nuisibles, qui se traduisent généralement par des couplages ou des effets induits entre composants par l'intermédiaire de flux **non fonctionnels**, donc non souhaités. Ces interactions, que nous qualifions d'**induites**, sont identifiées lors de l'analyse du problème (*cf.* tableaux d'aide à la construction des graphes d'association substances-champs MAL'IN en annexe 1). Elles interviennent par exemple sous forme de fonctions de contrainte, mais elles ne sont pas toujours prises en compte. Ces interactions peuvent lier deux, trois ou plusieurs composants à des niveaux systémiques différents. Si l'on considère toutes les interactions possibles, il existe C_p^q (nombre de combinaisons de p éléments choisis dans un ensemble de q éléments) interactions possibles entre p composants parmi q composants, où p est nécessairement supérieur ou égal à 2 (pour qu'il y ait interaction) et inférieur ou égal à q. Il existe donc au total 2^q-q-1 interactions possibles si l'on considère q composants (*cf.* figure 2-13). Ces interactions induites peuvent a priori apparaître entre deux composants quels que soient leurs niveaux systémiques (par exemple : rayonnement thermique ou électromagnétique). Ainsi, pour un système où l'on considère n éléments comme structurants du problème de conception, il y a au plus 2^n-n-1 interactions à considérer.

[10] Une interface fonctionnelle entre composants peut parfois être matérialisée par un élément, généralement standard, permettant l'assemblage de composants structurants d'un niveau donné et transmettant le flux aux composants, par exemple : éléments d'assemblage (boulons, écrous, colle, etc.), éléments de conduite (tubes, coudes, etc.), etc.

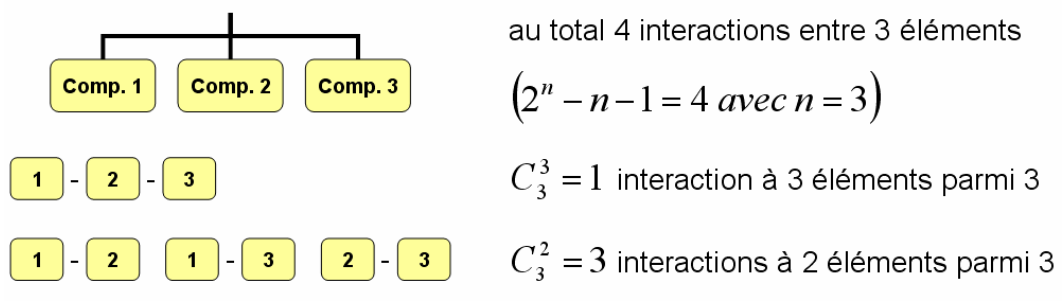


Figure 2-13 : Interactions induites, exemple pour n=3 composants

Ce nombre total d'interactions est à nuancer pour plusieurs raisons : tout d'abord, il ne tient pas compte des différents types de flux pouvant interagir, ensuite, différentes topologies d'une même interaction peuvent influencer la formalisation des modèles de ces interactions, en outre, il inclut les interactions fonctionnelles déjà identifiées à l'aide des BDF. Le fait de considérer 2^n*-n-1* interactions possibles permet d'être exhaustif et de ne pas « oublier » d'interactions qui, si elles n'étaient pas prises en compte pourrait éventuellement remettre en cause les solutions de conception obtenues à l'aide du modèle. On peut cependant noter que ce nombre peut devenir rapidement prohibitif avec *n*, il est donc nécessaire d'opérer une simplification parmi cet ensemble d'interactions afin de prendre en compte la réalité physique.

On peut tenter de déterminer s'il existe des liens privilégiés, permettant d'effectuer ces simplifications. Par exemple, pour un système à 6 éléments, il n'est pas nécessaire d'écrire 6 modèles d'interactions entre 5 éléments, plutôt qu'une interaction entre les 6 éléments. Partant de ce type de constatation, on a dégagé les règles suivantes permettant de simplifier l'identification des interactions induites pertinentes :

- la plupart des interactions pertinentes se font entre composants d'un même niveau et sont identifiées à l'aide des BDF, des effets induits liés à ces flux fonctionnels peuvent apparaître, on a donc des interactions induites qui peuvent se superposer aux interactions fonctionnelles, elles font généralement intervenir les mêmes composants ;
- une partie des interactions induites feront intervenir l'ensemble des composants du système (*e.g.* propagation de vibrations, problèmes de compatibilité électromagnétique) sans exception ;
- enfin, l'existence de gradients au sein d'un système fait généralement apparaître des couplages ou des effets induits entre composants de niveaux différents, ces interactions ne font donc intervenir que les composants où la grandeur considérée est un paramètre pertinent.

Ces règles ne sont cependant que des règles spécifiques liées à notre expérience mais difficilement généralisables, et il apparaît donc difficile d'être exhaustif dans l'identification des interactions induites pertinentes. C'est pourquoi nous proposons d'utiliser des listes d'effets physiques, classés par type de flux transmis, sur lesquelles on peut s'appuyer pour écrire différents modèles de couplage ou d'effets induits, elles permettent de ne pas oublier les principales interactions induites qui peuvent exister (*cf.* tableaux MAL'IN en annexe 1).

Nous avons vu dans cette section comment formaliser les modèles de composants et d'interactions à partir de la décomposition fonctionnelle obtenue précédemment ; le résultat, issu de la décomposition du système global, puis de la formalisation des modèles locaux est un modèle global constitué de l'ensemble des modèles formalisés. Il est nécessaire de valider le modèle global obtenu.

2 - VI VALIDATION DU MODÈLE GLOBAL : COHÉRENCE, QUALIFICATION

Nous avons obtenu au cours des phase d'analyse et de formalisation un modèle global du système à concevoir : d'abord sous la forme d'un OTe et de BDF, puis d'un modèle constitué de l'association de tous les modèles locaux. Il est nécessaire, afin de conserver une cohérence avec la démarche de modélisation, de se poser la question de la validité du modèle proposé.

Nous validons le modèle obtenu sur plusieurs plans :

1. sur le plan de la cohérence intrinsèque du modèle,
2. sur le plan du traitement du modèle global,
3. sur le plan de la qualification du modèle global vis-à-vis des objectifs exprimés.

2 - VI.1 Validation du modèle global

2 - VI.1.1 Cohérence intrinsèque

a. Complétude

En premier lieu, puisque le modèle doit servir à évaluer les solutions de conception, il faut s'assurer que tous les modèles et toutes les variables nécessaires à la détermination des choix de conception du système ont été établis.

Cette vérification peut être systématisée en suivant une logique s'appuyant sur l'OTe, en partant du premier niveau, puis en passant au niveau inférieur :

À partir de l'organigramme technique, il faut vérifier pour chaque niveau :

- qu'il existe pour chaque composant identifié et pour chaque flux fonctionnel le traversant, au moins un modèle de comportement,
- qu'apparaissent pour chaque modèle existant, les variables structurantes (variables de conception et variables critères).

À l'aide des BDF, il faut vérifier pour chaque niveau :

- qu'un modèle d'interaction existe pour chaque flux fonctionnel identifié,
- qu'un modèle d'interaction existe pour chaque interaction induite identifiée.

Il est nécessaire de préciser quel effet le choix du niveau d'un modèle de composant peut avoir sur la formalisation des modèles d'interaction (MI) et de composants (MC) du niveau directement inférieur. La figure 2-14 montre un OTe où l'on fait apparaître les composants constitutifs du niveau inférieur pour le composant 1. Les BDF des niveaux 1 et 2 montrent chacun la nécessité d'écrire les MI entre les composants du niveau 1 et entre les composants du niveau 2. Cependant, le fait de choisir le niveau 2 comme

niveau de représentation pour le composant 1 – par exemple, parce que le choix des composants 1.1 et 1.2 peut influencer un choix de conception pour le composant 2 – va imposer de faire également au niveau 2 le bilan des flux fonctionnels de niveau 1. De la même manière, modéliser le composant 1.1 au niveau inférieur, impliquerait de faire intervenir les composants du niveau 3 dans l'écriture des MI pour les flux fonctionnels de tous les niveaux supérieurs (niveaux 1 et 2). Le choix du niveau de représentation peut également faire apparaître des modèles d'interaction entre le composant 1 et chacun des composants 1.1, 1.2 et 1.3. Ces MI peuvent être par exemple des relations de positionnement relatif (flux de contact) ou seulement une contrainte de cohérence entre les variables d'entrée du composant 1 et les variables d'entrée du composant 1.1.

Ainsi, dans la vérification de la complétude des MI, il faut prendre en compte cet effet de la décomposition. Comme nous le verrons au paragraphe suivant, la logique du choix de niveau de représentation peut également imposer des contraintes de cohérence.

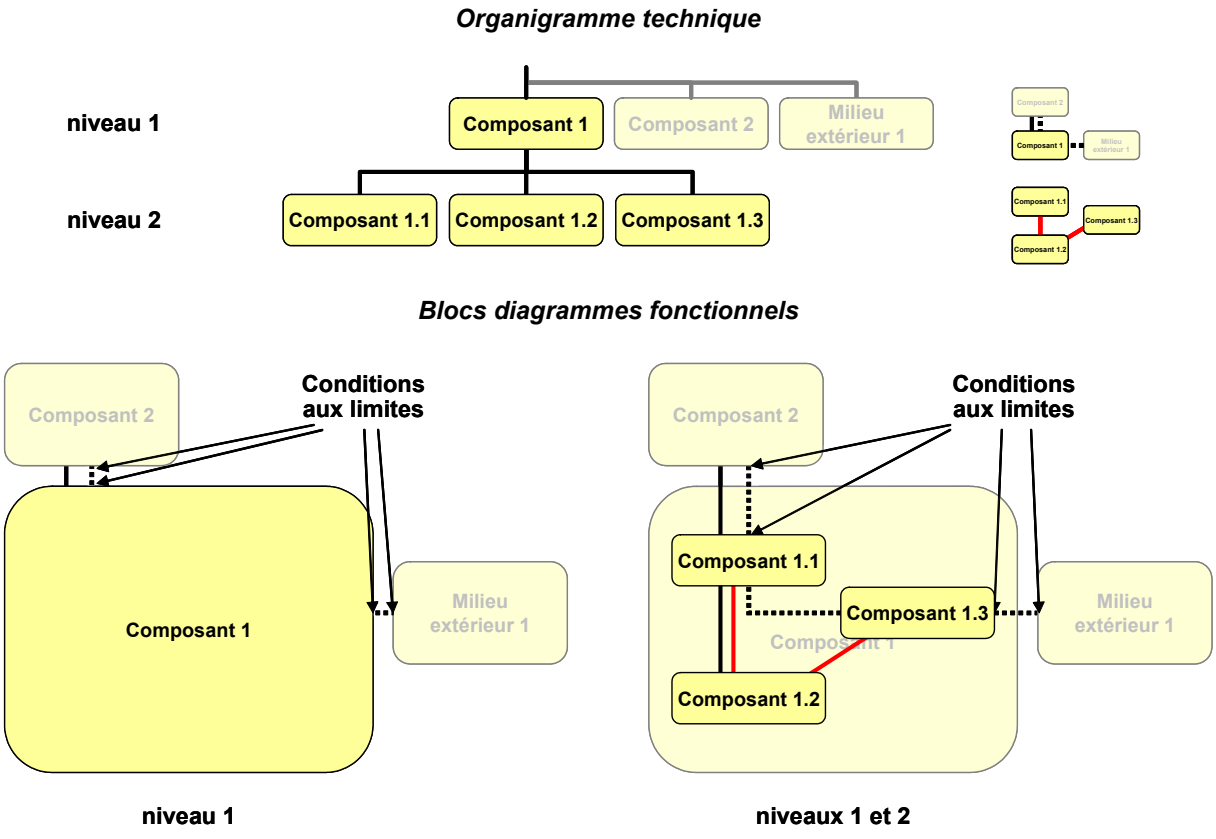


Figure 2-14 : Niveaux systémiques différents pour des modèles de composants

Dans le cas où toutes les variables et tous les modèles structurants identifiés ont été formalisés, on passe à l'étape suivante de validation du modèle global, dans le cas contraire une nouvelle étape de formalisation des modèles manquants est nécessaire.

b. Cohérence

À l'aide de l'OTe et des BDF, on a mis en évidence les modèles de comportement (composants, milieux extérieurs) et les modèles d'interaction structurants à écrire. Les modèles identifiés grâce aux différents outils présentés peuvent se situer à des niveaux systémiques de description différents et les modèles d'interaction font donc intervenir des modèles de comportement associés à des composants et des milieux extérieurs à des niveaux différents. Ils peuvent également exprimer des relations d'origines diverses (catalogues constructeurs, modèles de connaissance, etc.), ainsi que des modèles et des variables de description à des échelles différentes, allant de l'échelle du système ou d'un ensemble fonctionnel, à l'échelle mésoscopique. Il paraît donc indispensable de valider les modèles de comportement et d'interaction au travers de la cohérence entre les différents modèles explicités. Les BDF mettent en évidence les liens existant entre certains modèles de comportement situés à différents niveaux, présentant donc des variables de niveaux différents, ces graphes de représentation doivent aider à la mise en œuvre d'une cohérence entre les modèles (*cf.* figure 2-14).

Par conséquent, l'approche et les outils présentés dans la section précédente conduisent également, par l'intermédiaire de l'écriture des BDF, à l'analyse des couplages possibles entre les modèles de comportement grâce aux modèles d'interaction, à l'identification des conditions aux limites, des variables d'entrée et de sortie de chaque modèle d'un élément du système, etc. L'identification de ces couplages entre modèles doit permettre de conserver la cohérence nécessaire entre eux du point de vue du nombre et de la forme des variables.

Par l'intermédiaire de tous ces éléments, il est possible de vérifier que le modèle global est cohérent, c'est-à-dire que les modèles locaux « communiquent » bien entre eux. Il est possible, par exemple, qu'un modèle utilisant une variable d'un autre modèle ne soit pas formulé dans les mêmes dispositions :

- des variables représentant une même grandeur physique mais n'ayant pas le même sens (température en un point et température moyenne),
- deux modèles formulés dans des systèmes d'unités différents,
- ou un critère de performance défini par le cahier des charges incohérent avec la grandeur physique résultant du modèle évaluant la performance associée à ce critère, etc.

La question qui vient ensuite est : si les modèles proposés ne sont pas cohérents entre eux, que faut-il faire pour obtenir de tels modèles ou pour rendre le modèle global cohérent ?

Si l'on considère une interaction entre deux modèles de composant, par exemple : soit on invalide l'un des deux modèles, ce qui signifie que l'on peut mettre en œuvre une démarche d'adaptation ou proposer une autre formalisation du modèle, soit on invalide les deux modèles (adaptation ou nouvelle formalisation des deux modèles) pour les remplacer par de nouveaux modèles cohérents entre eux, soit enfin, on met en œuvre de nouvelles relations permettant de rendre ces modèles cohérents.

2 - VI.1.2 Validation pour le traitement des modèles

Notre but est de faire émerger des modèles qui traduisent le problème de conception conformément aux objectifs du concepteur et adaptés aux outils d'aide à la décision (*cf.* chapitre 1) en conception préliminaire.

Dans ce document, nous employons l'expression « outil de traitement » pour indiquer aussi bien un solveur numérique de PSC. qu'un autre outil d'aide à la décision utilisé dans le cadre d'une démarche de conception, comme des algorithmes d'optimisation ou encore des solveurs graphiques ou symboliques.

On trouve ainsi plusieurs outils de traitement commerciaux ou prototypes qui nécessitent une formalisation du comportement physique à l'aide de relations algébriques et analytiques :

- basés sur la programmation par contraintes ou le calcul symbolique : comme SpaceSolver [Lottaz, 2000], DeCoSolver [Sawada, 2001], Solution Path Generator [Rudolph et Bölling, 2002], Con'flex [CON'FLEX, 1998] nous utilisons pour notre part, *Constraint Explorer*(CE), présenté au chapitre 1,
- basés sur l'optimisation, on peut notamment trouver dans [Meckesheimer, 2001] une revue des outils d'optimisation multidisciplinaire (MDO, Multidisciplinary Design Optimization).

Chaque outil de traitement nécessite une syntaxe ou une forme des modèles qui n'est pas toujours compatible avec la forme des modèles existants ou avec la première écriture qui peut être proposée pour un modèle local. En outre, malgré la progression constante des capacités de calcul des machines, les outils sont limités en taille, en nombre et en complexité des problèmes à traiter. Il est donc nécessaire de valider l'adéquation du modèle global à l'outil afin qu'il puisse être traité et résolu.

Le modèle peut donc ne pas être traité par l'outil pour deux raisons :

a. pour des raisons de conformité du modèle au formalisme de l'outil,
b. pour des raisons de conformité du modèle à la capacité de l'outil.

Nous pensons que notre démarche peut s'appliquer à plusieurs outils de traitement différents, mais pour simplifier la compréhension, nous limitons notre étude aux outils d'aide à la décision du type solveurs de Problèmes de Satisfaction de Contraintes (PSC) numériques comme *Constraint Explorer* (CE).

a. Problèmes de syntaxe

Un modèle, tel que nous l'avons défini au § 2 - II.1, possède un caractère abstrait et fait nécessairement intervenir un objet d'étude, un besoin et enfin une représentation, et plus précisément un support de représentation. Nous avons montré dans les sections précédentes que plusieurs supports de représentation étaient possibles en conception : graphes de représentation, modèles mathématiques, modèles géométriques en CAO, etc. Étant donné que nous limitons notre démarche aux modèles de comportement physique, en vue d'évaluer les performances de comportement du système à concevoir, il est nécessaire à un moment donné de représenter ce type de modèle sous forme mathématique, au sens large du terme. Ceci signifie qu'il peut faire intervenir une multitude de concepts, de notions et de relations mathématiques, les plus courantes étant des relations du type analytique sous forme matricielle, tensorielle, d'équations différentielles, d'équations algébriques, etc. ; mais on trouve également de plus en plus de formalismes plus

spécifiques pouvant aider au dimensionnement, comme la logique floue ou les équations différentielles qualitatives pour la conception qualitative de mécanismes [Travé-Massuyès et al., 1997].

Il est donc indispensable de vérifier la cohérence de tous les modèles de comportement et d'interaction avec l'outil de traitement utilisé. En particulier, CE étant un logiciel de résolution de Problèmes de Satisfaction de Contraintes numériques, les équations différentielles sont incompatibles avec son utilisation. Un modèle de comportement formalisé à l'aide d'équations différentielles serait insoluble et donc inexploitable sous CE. En tant que solveur de PSC numérique, CE est parfaitement adapté au traitement de modèles formalisés par l'intermédiaire d'un ensemble de contraintes. L'outil de traitement que nous utilisons permet donc de résoudre les modèles formalisés à l'aide d'un ensemble de relations du type équations ou inéquations algébriques et analytiques.

Ainsi, si certains des modèles proposés sont en inadéquation avec l'outil de traitement après l'analyse de la conformité de toutes les relations et équations constitutives du modèle global et des modèles locaux, il faudra utiliser un autre outil mieux adapté au traitement de ces modèles, ou adapter les modèles à l'outil. La seconde démarche, d'**adaptation** des modèles à l'outil fait l'objet d'une partie de notre travail de recherche, et est présentée dans la suite du document.

b. Problèmes de capacité

De la même manière que la majorité des outils informatiques exigent une syntaxe particulière des modèles en vue de leur traitement, ils sont également limités en terme de capacité de traitement numérique ; et si ce n'est pas le cas, un modèle trop complexe mais soluble entraîne souvent un coût de traitement (temps, calcul, etc.) non négligeable. Le critère de parcimonie défini précédemment peut être une indication utile afin de déterminer ou d'évaluer le coût lié à la résolution d'un modèle par l'outil.

Nous proposons une nouvelle fois l'utilisation du PEPS en vue d'identifier les problèmes associés au traitement du modèle par l'outil. L'analyse de l'exploitabilité du modèle par rapport à l'outil de traitement et relativement à sa complexité fait appel à la qualification du modèle global.

2 - VI.1.3 Qualification du modèle global

Il est nécessaire de qualifier l'adéquation du modèle global, obtenu par l'association de tous les modèles locaux, aux objectifs fixés initialement pour la modélisation.

Nous proposons d'utiliser le PEPS (*cf.* § 2 - II.2.3) du modèle global afin de mesurer sa capacité intrinsèque à produire une aide à la décision conformément aux objectifs de modélisation. Ce modèle est constitué d'un ensemble de modèles interagissant entre eux, chacun pouvant être qualifié en terme de PEPS. Il est donc nécessaire de définir une logique de qualification du modèle global.

Deux possibilités peuvent se présenter pour définir un PEPS pour le modèle global :

- soit définir un moyen de mesure du PEPS global sans tenir compte des estimations des PEPS des modèles locaux,
- soit définir une « loi de composition » des PEPS des modèles locaux permettant d'en déduire une estimation du PEPS du modèle global.

La manière effective de mesurer le PEPS d'un modèle est développée au chapitre 4. Nous montrons qu'il est difficile d'évaluer le PEPS d'un modèle de manière exacte, c'est pourquoi nous avons pris le parti de ne pas définir une forme « d'arithmétique » permettant d'évaluer le PEPS du modèle global en fonction du PEPS des modèles locaux, bien que la qualification du modèle global est nécessairement influencée par le PEPS des modèles locaux.

a. Parcimonie globale

La parcimonie du modèle global permet d'estimer une forme de complexité du modèle global et d'identifier l'incompatibilité avec l'outil :

- parce que le nombre de variables associées au modèle global est trop élevé,
- parce que le nombre de relations associées au modèle global est trop élevé.

Dans ce cas, la parcimonie du modèle est insuffisante et il est nécessaire de modifier le modèle global en vue de le mettre en conformité avec l'outil de traitement. Ceci signifie qu'il faut :

- identifier quels sont les éléments du modèle global qui rendent la parcimonie globale insuffisante,
- identifier quels sont ceux que l'on peut ou doit adapter dans le but d'augmenter la parcimonie du modèle global,
- mettre en œuvre une démarche d'adaptation des modèles qui posent problème.

Nous appelons **réduction** de modèle l'opération qui consiste à adapter un modèle dans l'intention d'en augmenter la parcimonie. Nous détaillons dans la section suivante du document la démarche et les outils que nous proposons afin de **réduire** le nombre de variables ou le nombre de relations d'un modèle en vue de le mettre en adéquation avec l'outil.

b. Exactitude globale

L'estimation de l'exactitude globale obtenue est comparée à l'objectif initial :

- si l'estimation de l'exactitude du modèle global est inférieure à la valeur fixée initialement, le modèle est conforme en terme d'exactitude,
- si l'exactitude globale n'est pas conforme, le modèle global doit être modifié pour atteindre une exactitude conforme aux objectifs.

Dans le cas où le modèle n'est pas conforme, il est nécessaire de définir les actions à réaliser pour améliorer ces éléments : proposer un autre modèle ou adapter le modèle proposé pour augmenter l'exactitude du modèle global.

c. Précision globale

Une fois la précision du modèle global évaluée, il faut la comparer à la précision qui était souhaitée pour la modélisation du système (c'est une information qui peut être indiquée par le cahier des charges).

Deux possibilités se présentent alors :

- la précision du modèle global est conforme à la précision minimale attendue,
- la précision du modèle global est inférieure à la précision attendue.

Dans le second cas, il est nécessaire de mettre en œuvre une démarche d'analyse afin d'identifier quels sont les éléments du modèle global qu'il est nécessaire de modifier en vue d'augmenter la précision du modèle global, puis une démarche pour définir les actions à mener pour adapter les éléments limitants pour la précision globale et qu'on ne peut conserver tels quels.

d. Spécialisation globale

La spécialisation d'un modèle désigne l'ensemble des connaissances introduites qui restreignent le domaine de validité et donc le domaine d'application du modèle. La spécialisation fait intervenir différents types de connaissances liées : au domaine de validité des modèles locaux, ou aux hypothèses qui ont permis la formalisation des modèles. Il faut vérifier que la spécialisation du modèle n'empêche pas une exploration trop limitée de l'espace des solutions de conception. Si c'est le cas, une nouvelle fois, il faut définir une démarche d'analyse du modèle global dans le but de mettre en œuvre une stratégie afin de réduire la spécialisation globale du modèle.

2 - VI.2 Démarche d'adaptation

Nous avons indiqué qu'il fallait mettre en œuvre une démarche lorsqu'un paramètre du PEPS du modèle global ne concordait pas avec les exigences requises avant la phase de modélisation. Or, il se peut que plusieurs des paramètres du PEPS du modèle global ne soient pas conformes. Aussi, il est essentiel de structurer la façon dont on opère sur le modèle global en vue de l'adapter afin de hiérarchiser les actions à mener.

2 - VI.2.1 Analyse

Lorsqu'un paramètre du PEPS est inadapté pour le modèle global, il faut analyser de manière exhaustive quels sont les modèles qui sont limitants et qui dégradent le plus la parcimonie, l'exactitude la précision ou la spécialisation du modèle global. On obtient ainsi un ensemble de modèles locaux (MC et MI) pour lesquels au moins un et parfois plusieurs des paramètres du PEPS sont limitants et dont on sait qu'il faudra les adapter, et ce, de manière structurée, afin de ne pas chercher à améliorer séparément un paramètre du PEPS sans améliorer le PEPS global.

2 - VI.2.2 Hiérarchisation et biais d'attaque

L'ordre et la manière de procéder que nous proposons pour structurer la démarche d'adaptation des modèles s'appuient, dans l'ordre, sur les considérations suivantes :

1. La forme du modèle doit être conforme à l'outil de traitement. En effet, il est important de commencer par mettre les modèles en conformité avec l'outil de traitement pour pouvoir résoudre le modèle global afin de produire un résultat et permettre une aide à la décision en conception. Il est donc primordial d'adapter en premier lieu les modèles locaux dont la formalisation n'est pas en adéquation avec l'outil de traitement pour des problèmes de syntaxe.
2. Parmi les modèles locaux à adapter, les modèles d'éléments identifiés comme structurants de la conception, selon DS [Scaravetti et al., 2003] doivent être adaptés en premier. L'analyse du problème de conception, proposée par Dominique Scaravetti dans sa thèse, permet de hiérarchiser les éléments structurants du problème. Ainsi, tout au long de sa démarche pour structurer le problème de conception, on peut identifier des balises qui permettront de hiérarchiser les éléments du système entre eux.
3. On classe les modèles suivant chaque paramètre du PEPS : on commence par réduire les modèles non parcimonieux, puisqu'ils limitent la capacité de l'outil à la résolution du problème, puis on adapte les modèles peu exacts, peu précis et enfin on traite les modèles trop spécialisés.
4. Un autre critère de classification est le type de modèle à adapter. On adaptera en premier lieu les modèles d'interactions puisqu'ils font interagir les modèles de composants entre eux. Adapter un modèle d'interaction peut donc avoir des conséquences sur les modèles de composants, il est par conséquent préférable de les traiter le plus tôt possible.
5. Le dernier critère est lié aux techniques d'adaptation. Il est nécessaire d'identifier selon le problème d'adaptation considéré, quelle est la technique d'adaptation la mieux adaptée et quelles seront les conséquences sur les autres facteurs et les autres modèles à adapter.

Finalement, nous avons distingué trois types d'inadéquation du modèle global : une inadéquation du point de vue de la cohérence du modèle, une inadéquation du modèle en regard de l'outil de traitement et enfin une inadéquation du point de vue de la qualification du modèle, c'est-à-dire par rapport aux objectifs fixés en terme de modélisation et empêchant une prise de décision.

Dans le premier cas, il est nécessaire de mettre en cohérence les modèles locaux entre eux.

Dans les deuxième et troisième cas, si le modèle n'est pas validé sur le plan de la qualification ou s'il est inadapté à l'outil de traitement, il est nécessaire de mettre en œuvre une **réduction** ou une **adaptation** des modèles locaux identifiés comme étant limitants.

Il existe une prise de risque liée à l'utilisation d'un modèle en aide à la décision, nous tentons d'estimer ce risque au travers de la qualification des modèles. La démarche que nous mettons en place a pour but d'aider à la formalisation de modèles adaptés à l'outil de traitement tout en évaluant et en minimisant ce risque. Dans le paragraphe suivant, nous présentons les techniques d'adaptation de modèles, qui s'appuient sur la démarche d'adaptation que nous avons proposée dans cette section.

2 - VI.2.3 Techniques d'adaptation

Nous entendons par technique d'adaptation, toute méthode qui permet de faire évoluer la forme et/ou le PEPS du modèle en concordance avec les objectifs souhaités par le concepteur.

Nous avons identifié un certains nombres de techniques de modélisation que nous jugeons utiles pour adapter les modèles. Nous présentons dans ce paragraphe quelques techniques d'adaptation que nous ne détaillons pas. Ces techniques ont déjà fait l'objet de travaux développés par ailleurs [Sébastian, 2003].

- **Simplification de modèles** :

  La simplification d'un modèle permet d'améliorer la parcimonie d'un modèle, souvent au détriment de son exactitude.

- **Hypothèses spécialisantes** :

  Le fait d'énoncer des hypothèses spécialisantes permet généralement d'augmenter la parcimonie du modèle, le domaine d'application du modèle s'en trouve restreint.

- **Analyse dimensionnelle** :

  L'analyse dimensionnelle et le théorème de Vaschy-Buckingham [Taylor, 1974, Barenblatt, 1987, Rudolph, 1998] peuvent aider à formaliser des modèles en réduisant le nombre de variables. On peut donc augmenter la parcimonie des modèles en les adimensionnant.

- **Analyse expérimentale** :

  Le fait d'établir des modèles à l'aide de l'analyse expérimentale permet généralement d'expliciter des modèles parcimonieux et exacts [Bouchama, 2003]. En effet, les modèles obtenus sont établis sur la base d'un système réel. Toutefois, ils sont aussi spécialisés et imprécis, puisque les mesures sont réalisées sur un système expérimental et qu'elles sont entachées d'incertitudes dues, entre autres, aux appareils de mesure.

- **Techniques d'intégration formelle** :

  Les techniques d'intégration formelles permettent d'adapter des modèles écrits sous forme d'équations différentielles [MAPLE, 2004].

- **Théorie des Nombres d'Unités de Transfert (NUT) et modèles réseaux** :

  Il est possible d'augmenter la parcimonie des modèles de transfert thermiques ou de masse à l'aide de la théorie des NUT et à l'aide de la réduction de modèles réseaux [Hugget, 1998, Sébastian, 2003].

- **Méthode des surfaces de réponses** :

  Nous avons déjà présenté les techniques d'approximation de modèles au chapitre 1. Ces techniques présentent l'intérêt d'adapter des modèles formalisés par des codes de simulation très peu parcimonieux. En revanche, l'exactitude de ces modèles diminue, ou la spécialisation augmente, quand le nombre de variables pertinentes prises en compte augmente, car il est difficile d'obtenir une bonne approximation sur de vastes domaines. Ces techniques ont suscité un engouement récent avec l'utilisation des réseaux de neurones artificiels comme fonctions d'approximation [Hugget, 1998]. On peut trouver dans [Kleijnen et Sargent, 2000] une proposition de démarche de formalisation de

métamodèles, et dans [Meckesheimer, 2001] une revue récente des différentes techniques afin d'optimiser l'approximation de modèles.

Enfin, les techniques d'adaptation peuvent évidemment être utilisées simultanément. Par exemple, l'analyse dimensionnelle est couramment utilisée en couplage avec des essais expérimentaux pour déterminer des lois de comportement. En outre, Brückner montre l'intérêt de réaliser une analyse dimensionnelle avant de réaliser des modèles d'approximation [Brückner et Rudolph, 1998].

La figure 2-15, fait la synthèse de la démarche présentée dans ce chapitre, dans le but de formaliser des modèles d'aide à la décision adaptés à la conception préliminaire. Les numéros des sections de ce chapitre détaillant chaque étape y sont indiqués. La figure 2-16 présente le détail de la validation et de la qualification de modèles présentée en section 2 - VI.

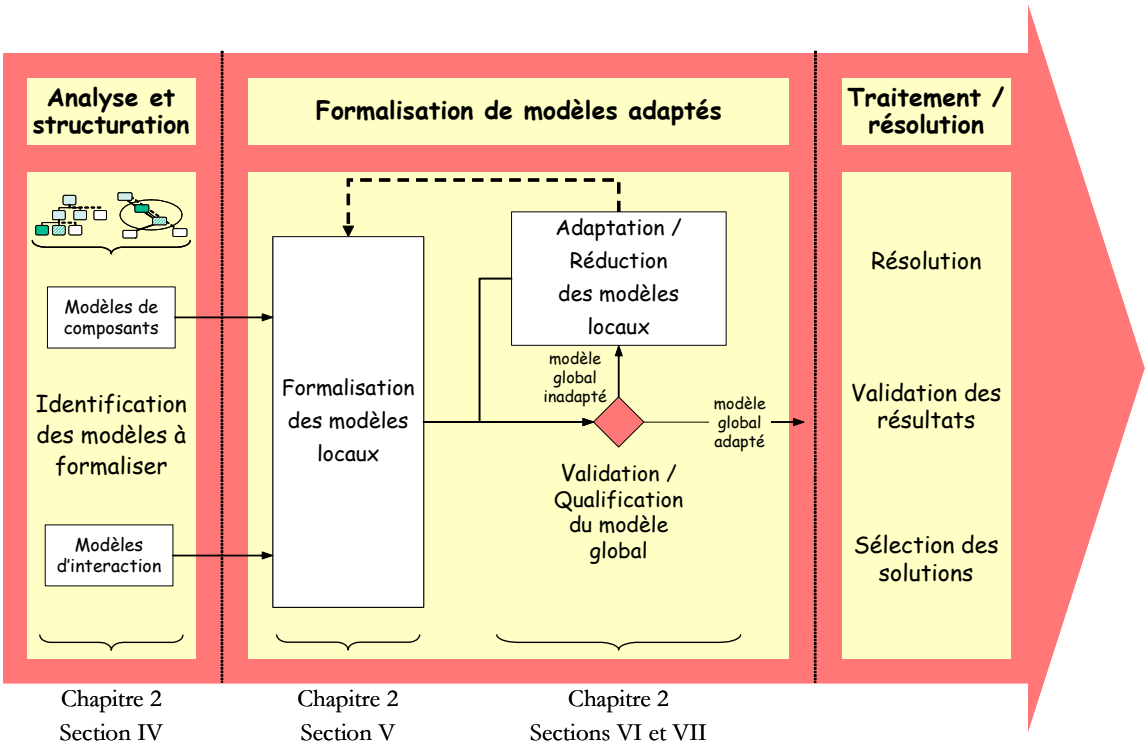


Figure 2-15 : Démarche globale de formalisation de modèles adaptés à la conception préliminaire

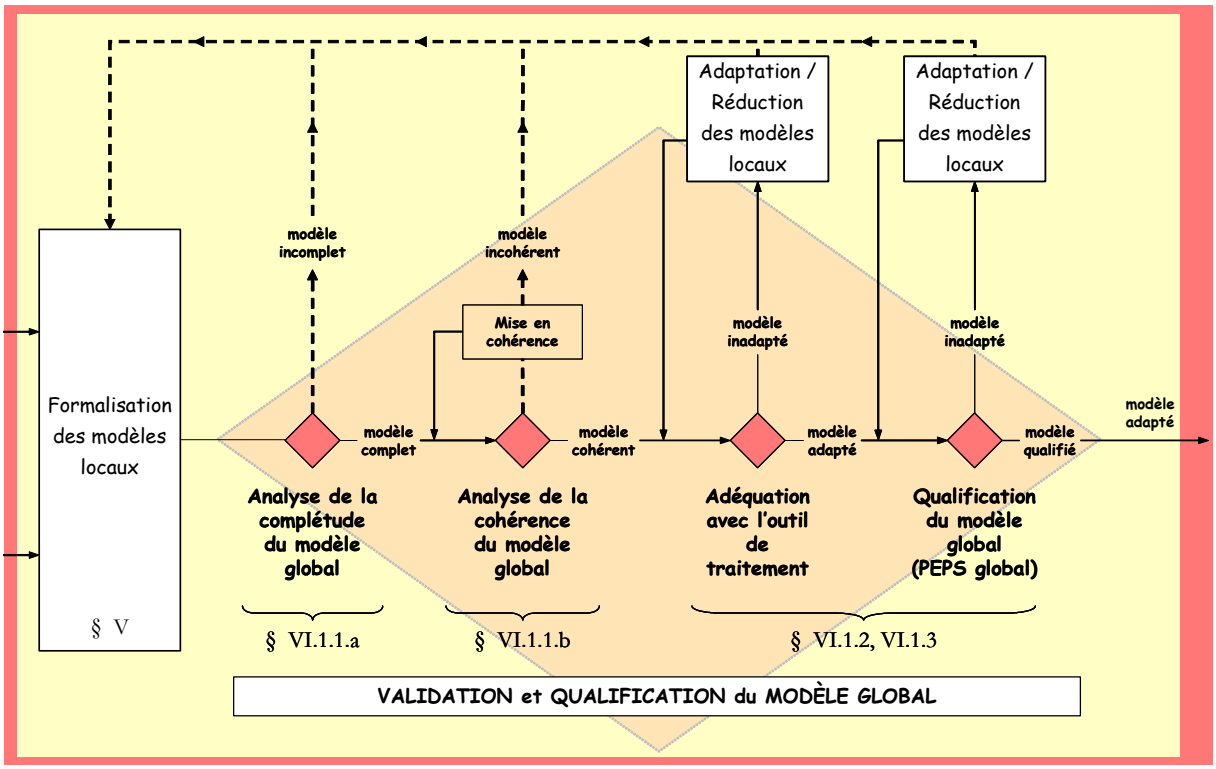


Figure 2-16 : Démarche de validation et de qualification de modèle, détail de la figure précédente

2 - VII CONCLUSION

Nous avons proposé une méthodologie globale permettant, à partir d'une structuration du problème, de construire un modèle de conception sous une forme que nous jugeons adaptée à la conception préliminaire. La démarche de formalisation de modèles offre, en particulier, la possibilité de résoudre un problème de conception préliminaire à l'aide des PSC.

L'ensemble de la démarche est fondé sur des outils dont l'objet est de conduire à un modèle exact, précis, parcimonieux, et peu spécialisé (*i.e.* recouvrant le plus possible l'espace de recherche de conception), et de répondre aux objectifs de conception et aux conditions de forme requises par l'outil de traitement.

Nous proposons une démarche de modélisation du problème de conception sous forme de contraintes. Cette démarche s'articule autour de deux étapes :

- l'étape de modélisation : elle conduit à l'émergence de plusieurs modèles de composants,
- l'étape d'adaptation, qui consiste à améliorer la forme des modèles en vue de leur traitement.

La qualité des modèles est évaluée tout au long de la démarche au travers des quatre critères suivants : la parcimonie, la précision, l'exactitude et la spécialisation.

À notre sens, c'est grâce à la combinaison de la démarche, de l'utilisation des 4 critères de qualification et de la phase d'adaptation, que l'on obtient des modèles de comportement adéquats à la conception préliminaire. Notre démarche aide le concepteur :

- à choisir le niveau de modélisation adapté pour chaque éléments constitutif du système,
- à proposer un modèle qui est en adéquation avec les objectifs de conception et l'outil de traitement.

Nous considérons pour notre part que la formalisation de modèles adaptés est une étape à part entière de la résolution d'un problème de conception architecturale. Nous pensons qu'elle permet une réelle intégration des contraintes de calcul en conception, en respectant les spécificités propres à la conception architecturale en terme de coût et d'objectifs de conception.

CHAPITRE 3

FORMALISATION d'un MODÈLE de BATTERIE de VÉHICULE ÉLECTRIQUE

OBJECTIFS :

L'objectif de ce chapitre est de mettre en application la démarche de formalisation de modèle à un cas particulier : la conception préliminaire d'un système de refroidissement d'une batterie de véhicule électrique (au sens large, pas uniquement terrestre). Le but est donc triple : mettre en œuvre la démarche sur un exemple, montrer la possibilité de proposer des modèles cohérents dans un cadre de conception préliminaire grâce à la démarche présentée, et enfin, montrer comment l'évaluation du PEPS global d'un modèle permet d'estimer un risque de conception lié à son utilisation.

3 - I CONTEXTE

La température de fonctionnement des batteries de véhicules électriques a une influence importante sur :

- le fonctionnement et le rendement de la batterie,
- sa capacité à la charge et à la décharge,
- sa durée de vie (nombre de cycles de charge et décharge).

La fonction d'un système de régulation thermique d'une batterie de véhicule électrique est donc multiple [Pesaran et Keyser, 2001] :

- de maintenir la température au cœur de la batterie dans un intervalle de température optimal pour son fonctionnement et sa durée de vie,
- de réduire les écarts de température internes à la batterie, c'est-à-dire d'assurer une distribution la plus homogène possible des températures.

Il est possible d'assurer cette fonction de régulation thermique par divers moyens : par refroidissement liquide ou par air.

Le principe de solution retenu peut être décrit comme suit. Une batterie est constituée d'une enceinte contenant des alignements de blocs (ou modules) dans lesquels sont placés des faisceaux. On peut voir sur la figure 3-1 un module à 5 alvéoles avec un faisceau dans l'une des alvéoles. Un faisceau est constitué d'une alternance de plaques d'alliage constituant chacune une électrode séparées par un isolant poreux imbibé d'électrolyte. Ce sont les faisceaux qui produisent l'énergie électrique nécessaire au fonctionnement de celle-ci. Les réactions électrochimiques qui ont lieu dans les modules sont une source de chaleur qui doit être évacuée pour éviter une surchauffe en certains points au cœur de la batterie. Cette chaleur est évacuée par échange convectif entre les parois des blocs et un fluide de refroidissement. Le fluide de refroidissement est amené et extrait de l'enceinte par un système de refroidissement dont les caractéristiques conditionnent les performances de la batterie et donc son dimensionnement.



Figure 3-1 : Élément de batterie avec un faisceau dans le boîtier

La conception préliminaire d'une batterie de véhicule électrique fait donc intervenir une démarche de conception architecturale. Chaque choix de conception influence le comportement de l'ensemble du système. Par conséquent, une solution de conception optimale demande des choix optimaux par rapport à l'ensemble de ses constituants et l'architecture choisie. Enfin, elle fait intervenir plusieurs critères d'optimisation (performances, coût, contraintes de fabrication, etc.). Une solution de conception définit les choix d'architecture et de dimensions de la batterie pour les alignements, les blocs électriques et également pour le système de refroidissement. Dans ce contexte, il est nécessaire de mettre en œuvre un modèle de comportement de la batterie qui permettent d'effectuer ces choix. Afin de simplifier la compréhension de la démarche sur cet exemple, nous ne montrons le déroulement de la démarche que pour une seule alternative de conception, celle qui est présentée, en outre, tout au long du chapitre. L'accent est mis sur la **modélisation des aspects thermiques** du système.

3 - II FORMALISATION D'UN MODÈLE

Nous cherchons à écrire un modèle de comportement global pour la batterie permettant de la dimensionner. Nous avons distingué dans la démarche présentée précédemment trois types de variables. Afin de caractériser les choix de conception pour la batterie, nous devons proposer un modèle global du système permettant d'évaluer et de comparer les solutions de conception (déterminées par les variables de conception VCo) d'après les valeurs de variables critères (VCr). À l'issue de recherches dans la littérature, nous ne disposons pas d'un tel modèle. Nous allons donc appliquer à la batterie la méthodologie développée et présentée précédemment.

3 - II.1 Phase d'analyse du besoin

La conception d'une batterie de véhicule électrique demande la prise en compte de contraintes différentes selon les situations de vie (montage, maintenance, recyclage, etc.). Nous limitons notre étude aux fonctions structurantes du système que nous identifions par l'intermédiaire des deux premières phases de la démarche de structuration de Scaravetti [Scaravetti, 2004] (analyse du besoin, analyse fonctionnelle). Nous retenons les fonctions suivantes comme structurantes de la conception architecturale de

la batterie (*cf.* tableau 3-1) dans les situations de vie de fonctionnement (cycle de décharge, lorsqu'elle fournit du courant), de maintenance, de sûreté de fonctionnement et de conception :

- Fonction de service : fournir du courant (**F**S1).
- Fonctions contraintes : assurer une bonne répartition de température (**S**C1), limiter l'encrassement en fonctionnement afin de réduire la fréquence des opérations de maintenance (**M**C1), minimiser la puissance consommée (**C**C1). La fonction **S**C1 induit également une fonction interne au système de refroidissement afin de réaliser la fonction **S**C1 : assurer une circulation du fluide de refroidissement (**S**C1-1).

Tableau 3-1 : Récapitulatif des fonctions, extrait du cahier des charges fonctionnel

SITUATIONS de VIE	**FONCTIONS de SERVICE / CONTRAINTE**		**CRITÈRES / NIVEAU d'APPRÉCIATION / FLEXIBILITÉ**		
Fonctionnement (décharge)	**F**S1	Fournir de l'énergie électrique pour l'ensemble des équipements électriques	• Tension • Capacité pour un état de charge donné (état 0)	V A.h	F0
Sûreté de fonctionnement	**S**C1	Assurer une bonne répartition de température dans la batterie	• Température max • ΔT max	[273,353] K [0,10] K	F0
	SC1-1	Assurer une circulation du fluide de refroidissement			F0
Maintenance	**M**C1	Limiter l'encrassement – dû aux particules en suspension présentes dans l'air extérieur – en fonctionnement, afin de réduire la fréquence des opérations de maintenance	• Durée de vie du système sans maintenance • Augmentation admise de Tmax en %	1000 heures 10% de Tmax	F0
Conception	**C**C1	Minimiser la puissance électrique consommée par rapport à la puissance utile	• Puissance consommée / puissance utile	en %	F0

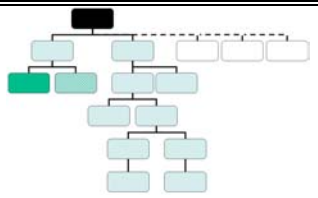
F0, flexibilité nulle (niveau impératif) ; F1, flexibilité faible (niveau peu négociable) ;
F2, flexibilité moyenne (niveau négociable) ; F3, flexibilité forte (niveau très négociable).

Remarque : Nous avons consigné ici la fonction contrainte **C**C1 de la situation de vie conception, ainsi que le critère d'appréciation de cette fonction. Cependant, ce critère de qualification de la conception est identifié à l'aide des premières lois d'évolution TRIZ, lors de l'analyse de la réalisation de la fonction **S**C1. Cette analyse ne peut être faite que lorsque les entités pertinentes apparaissent, c'est-à-dire au niveau 1. Nous présentons cet aspect au § 3 - II.2.2.

À partir de l'extrait du cahier des charges, on identifie les VCo et les VCr du système au niveau 0 ; seul le modèle du système au niveau 0 est à formaliser. Dans notre cas, aucun modèle de comportement

de la batterie n'est connu au niveau 0 de l'organigramme technique permettant de relier les VCo de la batterie aux VCr de niveau 0 pour chaque fonction. On peut cependant visualiser les variables critères au niveau 0 dans le tableau 3-2. D'après notre démarche, l'absence de modèle de composant en cohérence avec les objectifs de conception à un niveau donné impose de se placer au niveau inférieur et de réitérer la démarche d'analyse des modèles à formaliser. Nous effectuons donc notre analyse au niveau 1.

Tableau 3-2 : Modèle de composant au niveau 0

Niveau 0	**Batterie**		
VCo	**VCr**	**VI**	**Modèle de composant**
	U_{bat}, C_{bat}^{0} $T_{bat}^{\max}$, $\Delta T_{bat}^{\max}$ D_{filtre}, ΔT_{enc} $\frac{\wp_{cons}}{\wp_{util}}$		pas de modèle connu à ce niveau pour évaluer les VCr
Parcimonie Faible → Forte **Exactitude** Faible → Forte **Précision** Faible → Forte **Spécialisation** Forte → Faible ?			

Remarque : une variable écrite sous la forme suivante : VCr est une variable critère de niveau 0.

U_{bat}, C_{bat}^{0} : variables critères de niveau 0 pour la fonction de service **F**S1.

$T_{bat}^{\max}$, $\Delta T_{bat}^{\max}$: variables critères de niveau 0 pour la fonction contrainte **S**C1.

D_{filtre}, ΔT_{enc} : variables critères de niveau 0 pour la fonction contrainte **M**C1.

$\frac{\wp_{cons}}{\wp_{util}}$: variable critère de niveau 0 pour la fonction contrainte **C**C1.

Pour chaque modèle local formalisé (modèle de composant, modèle d'interaction), nous présentons un tableau similaire au tableau 3-2, indiquant le niveau systémique, le flux concerné, les variables (VCo, VCr, VI) et les relations du modèle. Nous estimons également son PEPS, mais de manière qualitative, puisque nous ne définissons qu'au chapitre 4 les procédures pour déterminer le PEPS d'un modèle. Toutefois, malgré sa subjectivité, cette estimation permet de montrer comment le PEPS d'un modèle local peut guider la formalisation du modèle global, notamment pour le choix du niveau de modélisation des modèles locaux. Nous présentons la qualification d'un modèle global au chapitre 5.

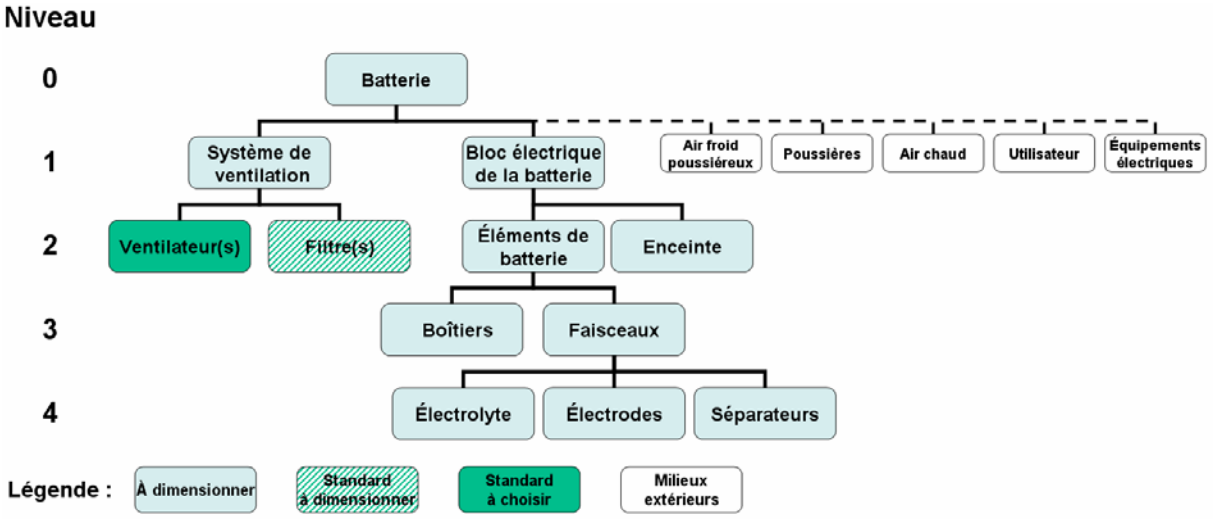


Figure 3-2 : Organigramme technique étendu du principe de solution de batterie de VE

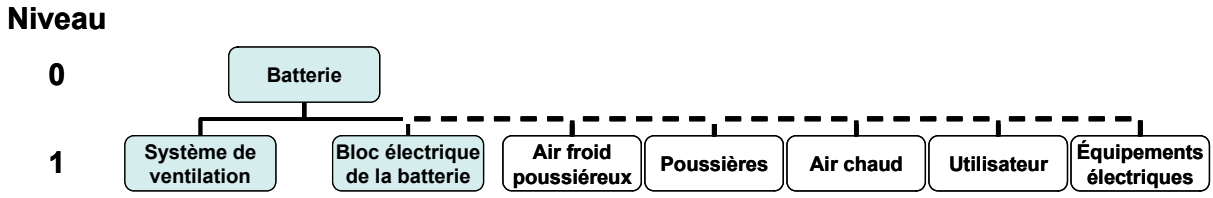


Figure 3-3 : Organigramme technique étendu de niveau 1 de la batterie

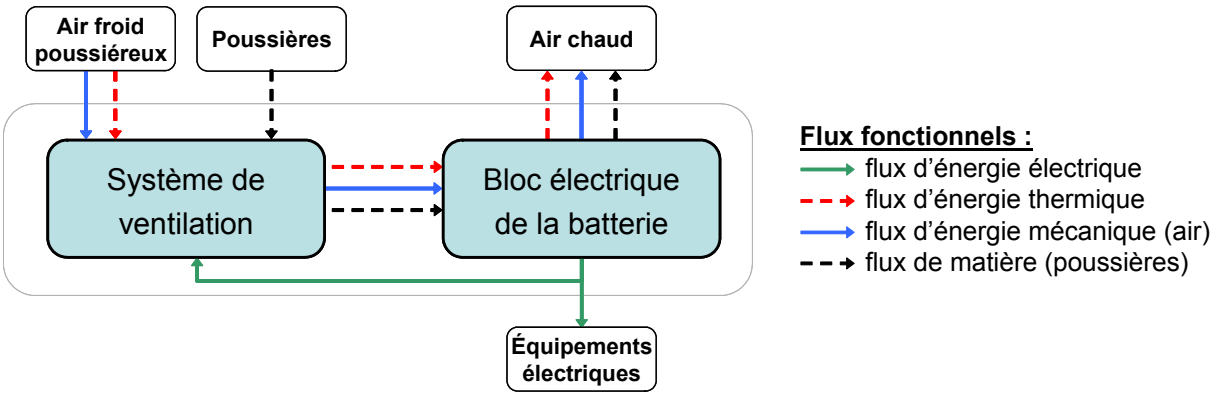


Figure 3-4 : Bloc diagramme fonctionnel de niveau 1 de la batterie

3 - II.2 Analyse au niveau 1

3 - II.2.1 Principe de solution

On trouve dans la figure 3-2, un organigramme technique étendu (OTe) du principe de solution réalisant les fonctions présentées ci-dessus. Il permet d'identifier quels sont les composants constitutifs de la batterie pour ce concept et quels sont les choix de conception à effectuer. Cet OTe est partiel, car il ne fait intervenir que les blocs fonctionnels en lien direct avec les fonctions considérées. Par exemple, le système de régulation et de commande du courant électrique ne figure pas dans l'organigramme, on fait donc l'hypothèse qu'il n'y a pas de couplage au niveau du dimensionnement, *i.e.* le système de régulation n'influence pas le comportement ou les critères de choix du reste de la batterie.

Si la régulation thermique par l'intermédiaire de liquide est plus efficace que le refroidissement par air, elle fait généralement intervenir plus de composants et demande plus d'efforts et de coût de maintenance. C'est pourquoi nous limitons notre étude au refroidissement par air. Le système de refroidissement est donc un système de ventilation, le fluide de refroidissement est l'air extérieur, qui est amené dans l'enceinte par des conduites et un (ou des) ventilateur(s) dont les caractéristiques conditionnent les performances du système de refroidissement.

La conception du système consiste à définir chacun des composants représentés dans l'OTe. Dans notre exemple, il n'y a pas de composant à concevoir complètement, un tel composant nécessiterait de mettre en œuvre un processus de conception complet (*i.e.* analyse du besoin, recherche de principes de solution, puis dimensionnement). Tous les blocs fonctionnels sont basés sur des principes de solution connus. Sur l'OTe de la figure 3-2, le(s) ventilateur(s) et le(s) filtre(s) sont choisis comme des composants standard sur catalogue. Les autres composants doivent être définis, il faut donc donner des valeurs pour chaque variable susceptible de faire une distinction entre deux solutions de conception d'un même composant (choix de forme, matériaux, dimensions, etc. et choix des sous-composants).

Les schémas de représentation ne sont pas exhaustifs au sens où certaines configurations ne sont pas prises en compte, mais ils sont utiles pour comprendre comment la batterie est susceptible d'être conçue et comment les composants interagissent entre eux. De plus, dans un souci de compréhension de notre démarche, selon les niveaux, nous faisons parfois intervenir des composants standard pour montrer l'intérêt du choix du niveau de représentation.

3 - II.2.2 Analyse des flux au niveau 1

Le principe de solution décrit dans la partie 3 - I peut être représenté à l'aide d'un OTe partiel et limité au niveau 1, présenté par la figure 3-3. Il fait intervenir les milieux extérieurs ayant une influence sur le comportement de la batterie. Au niveau 1, deux blocs fonctionnels permettent de réaliser les fonctions considérées : le système de ventilation, le bloc électrique de batterie (*cf.* figure 3-4). Pour chacune des fonctions considérées, il est nécessaire de proposer un modèle de conception préliminaire permet-

tant de qualifier les choix de conception à faire. À l'aide de la figure 3-3, on observe les modèles de composants (blocs fonctionnels et milieux extérieurs) à formaliser au niveau 1.

On peut effectuer, à l'aide des blocs diagrammes fonctionnels une représentation du système à modéliser (*cf.* figure 3-4). Elle permet de visualiser les liens existants entre les deux blocs fonctionnels au premier niveau de description.

Chacun des flux fonctionnels est en lien avec une des fonctions définies auparavant et nécessite la formalisation d'un modèle d'interaction entre les deux blocs fonctionnels. On a vu cependant au chapitre précédent que les BDF n'étaient pas exhaustifs quant à l'identification des interactions. Nous avons donc réalisé un graphe substances-champs du système au niveau 1 (*cf.* figure 3-5) afin d'identifier également les interactions dues à des effets nuisibles et/ou des effets induits.

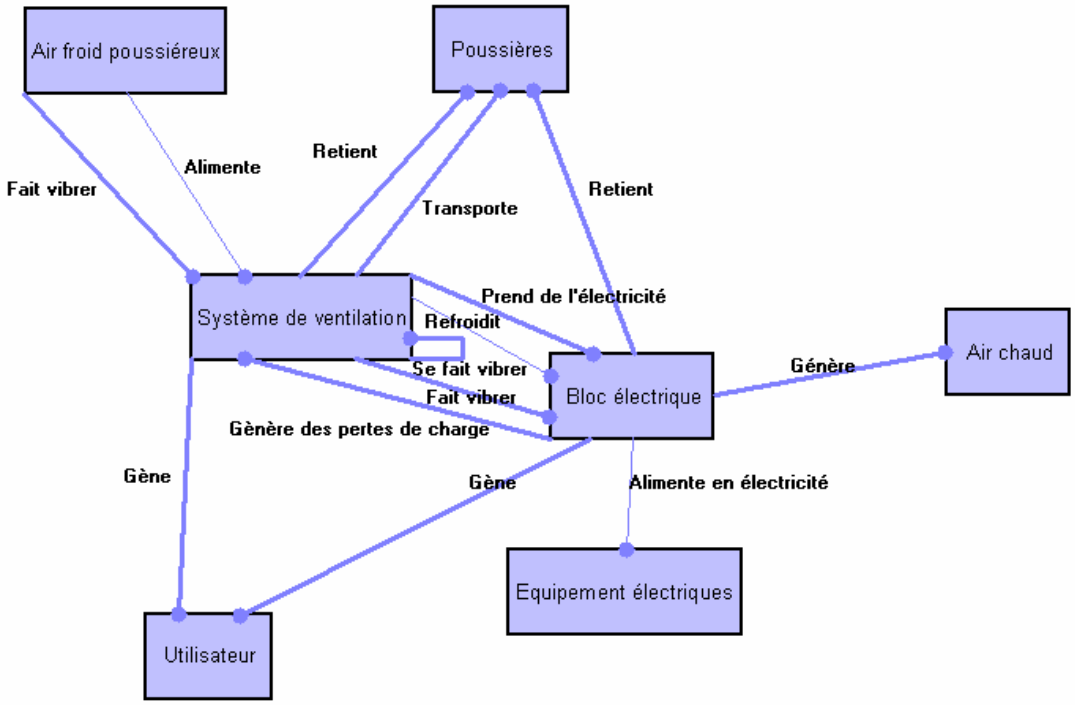


Figure 3-5 : Graphe d'association substances-champs (GSC) de la batterie au niveau 1

Le graphe substances-champs (GSC) permet d'identifier des effets induits, qui sont non structurants et non souhaités, il précise également les effets des composants sur les flux déjà traduits dans le BDF. Par exemple, le flux de matière est influencé par le système de ventilation qui « retient les poussières », cela précise le modèle de composant du système de ventilation associé à ce flux. Le concepteur doit ensuite évaluer l'influence de ces effets sur la qualification de la conception, pour décider d'en tenir compte ou non dans le modèle.

En plus des quatre flux fonctionnels associés aux fonctions de niveau 0, la construction du graphe substances-champs a permis d'identifier des effets physiques induits par les flux fonctionnels, parmi lesquels nous retenons des nuisances sonores pouvant provoquer une gêne auprès de l'utilisateur. Ces nuisances sont générées par le ventilateur et par l'écoulement de l'air dans les éléments de la batterie, elles impliquent une nouvelle fonction contrainte à ajouter : limiter les nuisances sonores pour

l'utilisateur (**FC1**), qui définit un niveau de puissance sonore admissible pour l'ensemble du système. Certains effets identifiés (dilatations thermiques, rayonnement, etc.) n'ont pas été représentés, car leur influence est négligeable, que ce soit sur le comportement physique du système ou que ce soit sur la conception.

Au niveau 1, le bloc diagramme fonctionnel de la batterie complété des effets induits peut alors être représenté comme indiqué par la figure 3-6.

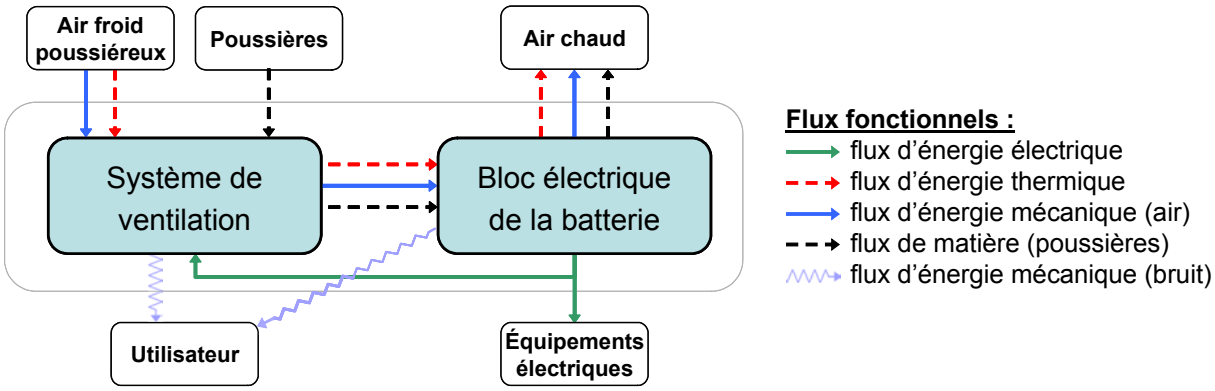


Figure 3-6 : Bloc diagramme fonctionnel de la batterie au niveau 1

3 - II.2.3 Qualification de la conception

Nous avons indiqué dans le chapitre 3 que les trois premières lois d'évolution de la théorie TRIZ permettent également de qualifier la conception (*cf.* annexe 1). Nous utilisons les deux premières lois pour qualifier la conception du système de refroidissement de la batterie.

La figure 3-7 donne une illustration de la loi d'intégralité des parties. Cette loi indique, que pour une action donnée, quatre entités (moteur, transmission, opérateur, contrôle) doivent intervenir dans la réalisation de l'action. Nous considérons la fonction contrainte **SC1** dont l'objet est d'assurer une bonne répartition de température dans la batterie (situation de vie : sûreté de fonctionnement). On s'aperçoit dans ce cas que, du point de vue de la conception, il est nécessaire de faire intervenir un moyen de contrôle. Mais comme nous l'avons vu précédemment, nous ne considérons pas l'aspect de la régulation ou de la commande du système.

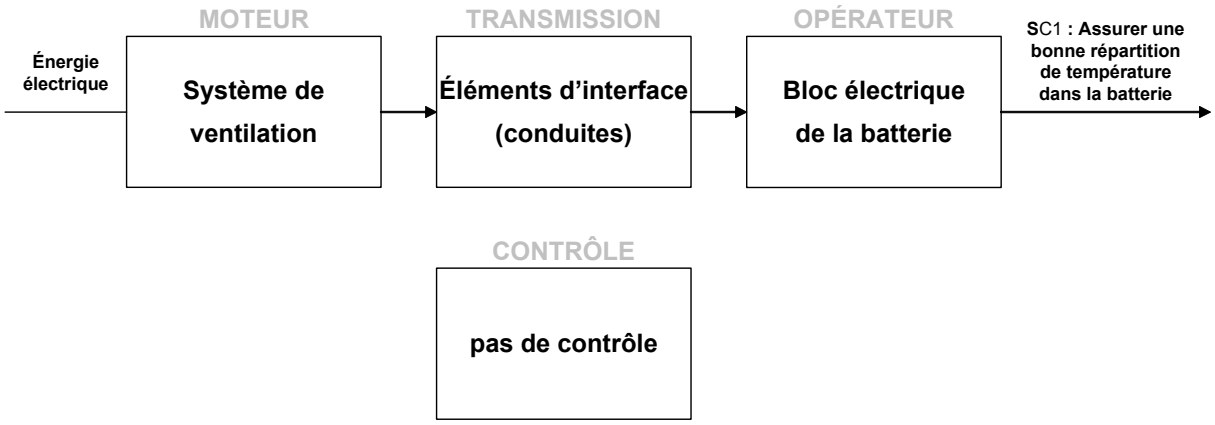


Figure 3-7 : Loi d'évolution TRIZ : intégralité des parties

La loi de la conductivité énergétique préconise que la transmission d'énergie doit être la plus efficace possible entre toutes les entités lors de la réalisation de l'action. Afin de réaliser la fonction **S**C1, le système de ventilation génère le flux de circulation de l'air, les conduites assurent la canalisation du flux d'air, enfin, le bloc de la batterie est le lieu des transferts thermiques par convection et par conduction. Le besoin réel concernant la réalisation de l'action considérée est associé au bloc électrique et à l'énergie dépensée pour évacuer la chaleur. La chaleur évacuée par convection est liée à l'énergie mécanique nécessaire au refroidissement du bloc au travers des pertes de charge créées dans le bloc, grâce à l'analogie de Colburn (*cf.* chapitre 4).

Cependant, la réalisation de l'action et la transmission de l'énergie entre l'entité motrice et l'entité effectrice entraînent des pertes énergétiques qu'il est nécessaire de quantifier et de minimiser. Grâce à la loi d'intégralité des parties, on peut voir, au niveau 1, quels intermédiaires existent entre le système de ventilation et le bloc de batterie. On constate que pour évacuer la chaleur du bloc, il est nécessaire de transformer l'énergie électrique en énergie mécanique (moteur), de transmettre cette énergie mécanique – avec des pertes de charge –, pour obtenir l'énergie mécanique utile au refroidissement (opérateur). L'énergie minimum requise est l'énergie dissipée pour le transfert thermique dans le bloc. Par le jeu des rendements, cette puissance est incluse dans la puissance consommée par le système de ventilation pour créer la circulation de l'air. La puissance consommée par le ventilateur est prélevée sur la puissance fournie par la batterie. Un critère de qualification de la conception du point de vue de l'efficacité énergétique du système est donc donné par la puissance consommée par le système de ventilation rapportée à la puissance délivrée par la batterie : $\frac{\wp_{cons}}{\wp_{util}}$

Les lois d'évolution TRIZ ont permis d'identifier un critère de qualification de la conception pour le système de refroidissement de batterie. La formalisation de ce modèle ne présente pas de difficultés. Nous ne détaillerons donc pas sa formalisation, puisque les modèles formalisés pour les autres fonctions font intervenir les variables nécessaires à son évaluation, comme nous le verrons par la suite.

3 - II.2.4 Bilan de l'analyse des flux au niveau 1

Finalement, l'ensemble des flux représentés sur le BDF va induire la formalisation de cinq modèles d'interaction. Ces modèles d'interaction sont des bilans de conservation, qui, selon qu'ils sont modifiés ou non par les blocs fonctionnels, nécessitent la formalisation ou non de modèles de composants. Nous faisons le bilan des modèles d'interaction et de composants à formaliser à ce niveau :

- Flux d'énergie thermique **(FET)** : on fait l'hypothèse qu'en régime permanent, les blocs fonctionnels du système de ventilation ne modifient pas le flux d'énergie thermique, le seul modèle de composant à formaliser est donc le modèle de composant pour le bloc électrique de la batterie.
- Flux d'énergie électrique **(FEE)** : le système de ventilation et le bloc électrique modifient ce flux.

- Flux d'énergie mécanique, dû à la circulation de l'air **(FEMA)** : chaque composant représenté sur la figure 3-4 influence ce flux et le débit d'air, puisque chaque élément est responsable de la création d'une différence de pression en son sein.
- Flux d'énergie mécanique, dû au bruit **(FEMB)** : les deux blocs fonctionnels influencent ce flux.
- Flux de matière (poussières) **(FM)** : de la même manière, chaque composant fait l'objet de dépôt de poussières : sur les parois du système de ventilation ou du bloc de la batterie (encrassement).

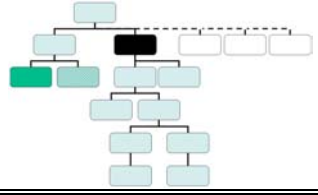
Les flux sont couplés, donc les niveaux de représentation choisis pour un flux déterminent le niveau pour les autres. Notamment, le flux d'énergie thermique est conditionné par le débit d'air et les pertes de charge dans la batterie, le dépôt de poussières est également conditionné par les pertes de charge. Ainsi, les différents flux et les niveaux de représentation choisis ne demandent pas de formaliser les modèles pour les mêmes composants. C'est pourquoi nous les détaillons par la suite suivant chaque flux à considérer.

3 - II.2.5 Modèles de composants

À ce stade de l'étude, on ne dispose pas de modèle générique des blocs fonctionnels de niveau 1 pour déterminer les différents choix de conception possibles pour le concept de solution présenté. En revanche, il est possible de choisir les blocs fonctionnels parmi des composants standard, c'est-à-dire dans un catalogue. Afin de déterminer quel composant choisir, les modèles font intervenir les variables de conception suivantes : référence et type d'un système de ventilation, référence et type d'un bloc électrique de batterie (cf. tableau 3-3 et tableau 3-4).

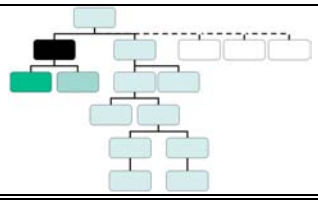
a. Modèles de composant du bloc électrique et du système de ventilation

Tableau 3-3 : Modèle de composant du bloc électrique standard (niveau 1)

Niveau 1	**Bloc électrique**			
VCo	**VCr**	**VI**	**Modèle de composant**	
Référence catalogue de bloc	C_{bbat}^{0} * U_{bbat} * ΔP_{bbat} * N_{bbat}^{dB}	Q_{bbat}	**FET**	pas de modèle connu à ce niveau pour évaluer les VCr
			FEE	$C_{bbat}^{0} * U_{bbat} *$
			FEMA	$\Delta P_{bbat} = f(Q_{bbat})$ *
			FEMB	$N_{bbat}^{dB} = 10 \cdot log(b \cdot Q_{bbat} \cdot \Delta P_{bbat}^{2})$ (b=cste)
			FM	pas de modèle connu à ce niveau pour évaluer les VCr
Parcimonie Faible → Forte **Exactitude** Faible → Forte **Précision** Faible → Forte **Spécialisation** Forte → Faible ?				

* **données catalogue constructeur**

Tableau 3-4 : Modèle de composant du système de ventilation standard (niveau 1)

Niveau 1	**Système de ventilation**			
VCo	**VCr**	**VI**	**Modèle de composant**	
Référence de système de ventilation	$Q_{sventil}$ * $\Delta P_{sventil}$ $\eta_{sventil}$ * $\wp_{sventil}$ $\varepsilon_{sventil}$ * $N^{dB}_{sventil}$ * $\kappa_{sventil}$ * $D_{sventil}$	$\mathbf{c}_0$ $\mathbf{c}^{p}_{air}$ (1) $\mathbf{c}^{p}_{sventil,s}$ (1)	**FET**	Le composant n'influence pas ce flux (cf. 3 - II.2)
			FEE	$\wp_{sventil} = \frac{Q_{sventil} \cdot \Delta P_{sventil}}{\eta_{sventil}}$
			FEMA	$Q_{sventil} = f(\Delta P_{sventil})$*
			FEMB	$N^{dB}_{sventil}$ *
			FM	$D_{sventil} = \frac{\kappa_{sventil}}{Q_{sventil} \cdot \mathbf{c}_0 \cdot \varepsilon_{sventil}}$ $\forall p \quad \mathbf{c}^{p}_{sventil,s} = (1 - \varepsilon_{sventil}) \cdot \mathbf{c}^{p}_{air}$
Parcimonie Faible → Forte **Exactitude** Faible → Forte **Précision** Faible → Forte **Spécialisation** Forte → Faible ?				

*** données catalogue constructeur**
(1) (x nombre de classes de particules p)

VCo	**VCr**				
Réf.	$Q_{sventil}$	$\eta_{sventil}$	$\varepsilon_{sventil}$	$N^{dB}_{sventil}$	$K_{sventil}$

1 référence de ventilateur ⟺

- **1 combinaison de valeurs possibles pour les variables critères standard**
- **+ 1 courbe débit pression :**

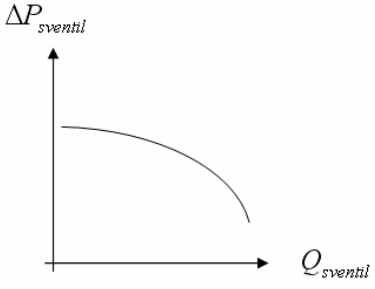


Figure 3-8 : Pour un composant standard, les valeurs des VCr sont associées aux valeurs des VCo par l'intermédiaire de catalogues

b. Données catalogue constructeur

Les données catalogue sont fournies par les constructeurs de composants standard. Les variables de conception et les variables critères prennent leurs valeurs dans des ensembles discrets déterminés par un (ou des) catalogue(s). Ces variables sous-tendent une relation entre les VCo et les VCr dont les valeurs sont associées : lorsque les variables de conception ont une valeur attribuée (*e.g.* une référence d'un catalogue), le n-uplet des valeurs des variables critères est complètement déterminé. Parfois, lorsque certaines VCr prennent leurs valeurs dans des ensembles continus, un modèle est donné par le fabricant sous forme de relations ou d'abaques reliant les VCo aux VCr (*e.g.* : courbe débit/pression). La figure 3-8 illustre pour l'exemple du ventilateur les liens qui existent entre les VCo et VCr d'un composant standard.

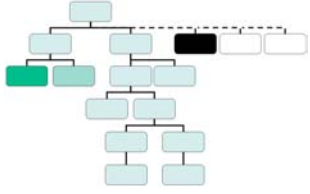
3 - II.2.6 Modèles de comportement : milieux extérieurs

Chacun des flux représentés en figure 3-4 est relié avec un des milieux extérieurs de l'OTe. Cela signifie qu'il est nécessaire de formaliser un modèle de comportement pour ces milieux extérieurs. Ces modèles sont fortement liés à l'analyse du besoin et aux contraintes associées à ces milieux identifiées lors de la rédaction du cahier des charges fonctionnel.

a. Air froid poussiéreux

Ce modèle est limité à un modèle de température et de pression pour l'air extérieur en fonction de l'altitude, ainsi que des lois de comportement en fonction de la température de l'air pour la masse volumique, la viscosité dynamique, la conductivité thermique et la capacité calorifique massique (*cf.* tableau 3-5).

Tableau 3-5 : Modèle de comportement de milieu extérieur : air froid poussiéreux

Niveau 1	**AIR FROID POUSSIÉREUX**
VI	**Modèle de milieu extérieur**
$P_{air,ext}$, z $T_{air,ext}$, ρ_{air} μ_{air} , Cp_{air} λ_{air}	$f_1(T_{air,ext}, P_{air,ext}, z) = 0$ $\rho_{air} = f_2(T_{air,ext}, P_{air,ext}, z)$ $\mu_{air} = f_3(T_{air,ext}, P_{air,ext})$ $Cp_{air} = f_4(T_{air,ext}, P_{air,ext})$ $\lambda_{air} = f_5(T_{air,ext}, P_{air,ext})$
Parcimonie Faible → Forte **Exactitude** Faible → Forte **Précision** Faible → Forte **Spécialisation** Forte → Faible	

b. Poussières de l'air ambiant

Pour les poussières, il faut définir une ambiance de poussières en cohérence avec l'analyse du besoin pour le produit (répartition granulométrique des poussières). Il est difficile de définir un modèle précis et exact de la composition en particules de l'air ambiant puisqu'elle varie fortement en fonction de nombreux facteurs. La propreté de l'air d'une ville est par exemple liée au nombre d'habitants, mais on peut trouver en deux points géographiques relativement proches des concentrations et des répartitions en particules différentes [Gabet, 1999]. Nous allons utiliser une ambiance dite de référence qui correspond à une répartition en particules données par le tableau 3-6 dont la concentration massique globale est de $C_{0,réf.}$ ($C_{0,réf}$=5.10^{-9} kg/m^3 d'air) [AICVF, 1991].

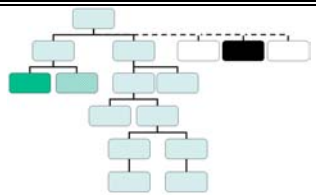
Tableau 3-6 : Répartition des particules de poussières (a) pour un air très propre (zone rurale), (b) pour un air sale (zone urbaine) [AICVF, 1991]

d_p / $\overline{d_p}$ (µm)		Nombre de particules par litre d'air **(a)** $C_{0,réf}$=5.10^{-9} kg/m^3	Nombre de particules par litre d'air **(b)** C_0=160.10^{-9} kg/m^3	Concentrations massiques dans l'air C_{air}^{p} **(c)** (10^{-9} kg de particules p / m^3 d'air)
[0,0.1]	0,05	0	0	0
[0.1,0.17]	0,135	125062	4001984	9,5
[0.17,0.27]	0,22	112475	3599200	37,1
[0.27,0.42]	0,345	25692	822144	32,7
[0.42,0.62]	0,52	2100	67200	9,2
[0.62,0.87]	0,745	623	19936	8,0
[0.87,1.17]	1,02	185	5920	6,1
[1.17,1.52]	1,345	66	2112	5,0
[1.52,1.92]	1,72	16	512	2,5
[1.92,2.37]	2,145	12	384	3,7
[2.37,2.87]	2,62	6	192	3,3
[2.87,3.42]	3,145	4	128	3,9
[3.42,4.02]	3,72	2	64	3,2
[4.02,6.12]	5,07	1	32	4,0
[6.12,10]	8,06	2	64	32,5
[10,∞]	10	0	0	0

La concentration massique de cette ambiance de référence et le tableau de répartition granulométrique permet d'estimer une densité des poussières de l'ordre de $\overline{\rho_p} \approx 1850\, kg.m^{-3}$. Cette masse volumique dépend en réalité de la composition des poussières et de l'endroit où l'on se situe, elle est supposée constante pour le modèle du milieu extérieur des poussières. Ainsi, pour chaque classe de particule, la masse volumique des particules est de $\overline{\rho_p}$. La répartition granulométrique de l'ambiance de référence est également considérée comme constante, cela signifie que la proportion du nombre de particules est conservée pour chaque classe de diamètre. Grâce à ces deux hypothèses, on peut définir plusieurs am-

biances connaissant la concentration massique globale $\mathbf{c_0}$ en particules de poussières de différentes ambiances d'air. Nous prenons pour notre part, $\mathbf{c_0}$=160.10^{-9} kg/m^3 d'air, qui correspond à une ambiance d'air d'une zone urbaine (1 million d'habitants). On en déduit une estimation de la concentration massique en air par classe de particules (donnée dans le tableau 3-6 (c)) : $\mathbf{c}^{\mathbf{p}}_{air} \approx 1000 \cdot nppl \cdot \overline{\rho_p} \cdot \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot \left(\frac{\overline{d_p}}{2} \right)^3$.

Tableau 3-7 : Modèle de comportement de milieu extérieur : poussières

Niveau 1	**POUSSIÈRES**
VI	**Modèle de milieu extérieur**
$\mathbf{c}^{\mathbf{p}}_{air}$ (1), $\overline{d_p}$ (1), $\overline{\rho_p}$	p couples $\left(\overline{d_p}, \mathbf{c}^{\mathbf{p}}_{air}\right)$ (*cf.* tableau 3-6 (c)) $\overline{\rho_p} \approx 1850\, kg.m^{-3}$
Parcimonie Faible → Forte **Exactitude** Faible → Forte **Précision** Faible → Forte **Spécialisation** Forte → Faible	

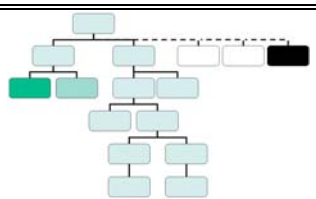
(1) (x nombre de classes de particules p)

On a défini un modèle pour les poussières présentes dans l'air environnant le système (*cf.* tableau 3-7). L'exactitude de ce modèle est liée au raffinement avec lequel l'intervalle des diamètres de particules est découpé, cependant, une discrétisation plus fine des classes de diamètre des particules aurait largement dégradé la parcimonie du modèle.

c. Équipements électriques

Pour les équipements électriques, on définit un scénario de consommation type qui est structurant pour le dimensionnement de la batterie, ce scénario est dans notre cas une consommation électrique constante en conditions extrêmes pour la batterie.

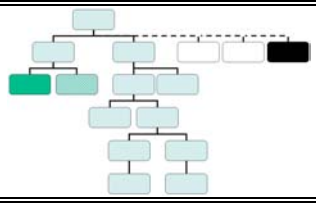
Tableau 3-8 : Modèle de comportement de milieu extérieur : équipements électriques

Niveau 1	**ÉQUIPEMENTS ÉLECTRIQUES**
VI	**Modèle de milieu extérieur**
C^0_{util}	C^0_{util}
Parcimonie Faible → Forte **Exactitude** Faible → Forte **Précision** Faible → Forte **Spécialisation** Forte → Faible	

d. Air chaud

L'air chaud est défini uniquement par la température de sortie de l'air chauffé par le bloc de la batterie. Le fait de considérer cet élément dans la décomposition fonctionnelle peut amener à identifier des contraintes supplémentaires, notamment sur une température maximale acceptable pour éviter les risques de brûlures vers l'extérieur.

Tableau 3-9 : Modèle de comportement de milieu extérieur : air chaud

Niveau 1	**AIR CHAUD**	
VI	**Modèle de milieu extérieur**	
$T_{air\ chaud}$, $T_{air,sort}$	$T_{air\ chaud} = T_{air,sort}$	
Parcimonie Faible → Forte **Exactitude** Faible → Forte **Précision** Faible → Forte **Spécialisation** Forte → Faible		

e. Utilisateur

La sensibilité de l'oreille humaine à certaines fréquences a amené à l'expression de plusieurs échelles de niveaux acoustiques, dont la courbe de pondération de décibels A [Azais et al., 1995]. Le critère de pertinence de la conception est donc le niveau de bruit perçu par l'utilisateur exprimé en dBA. Nous ne définissons pas de modèle pour l'utilisateur, en revanche, le fait de l'avoir identifié comme un milieu extérieur structurant conduit à une contrainte de cohérence dans l'expression des MC et des MI pour le flux d'énergie mécanique associé au bruit. En effet, les variables critères correspondant à ce flux doivent être exprimées en dBA, si ce n'est pas le cas, l'exactitude du modèle doit être qualifiée pour estimer l'erreur faite sur la détermination de ces critères.

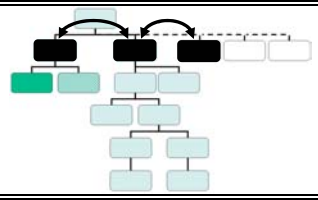
3 - II.2.7 Modèles d'interaction

Les modèles d'interaction ne font intervenir que deux blocs, ils sont simples à exprimer.

a. Flux d'énergie thermique **(FET)**

$T_{air,ent}$ est la température de l'air à l'entrée du bloc électrique de la batterie, $T_{air,ext}$ est la température de l'air extérieur. Si l'on suppose que les seuls échanges de chaleur se font par convection forcée avec l'air ventilé, le modèle d'interaction (MI) est donné par le tableau 3-10.

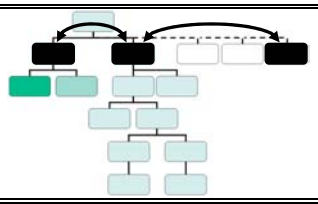
Tableau 3-10 : Modèle d'interaction au niveau 1 pour le flux d'énergie thermique

Niveau 1		Flux d'ÉNERGIE THERMIQUE	
VCo	**VCr**	**VI**	**Modèle d'interaction**
		$T_{air,ext}$, $T_{air,ent}$, Φ_{air} , $\Phi_{refroidissement}$	$T_{air,ent} = T_{air,ext}$, $\Phi_{air} = \Phi_{refroidissement}$
Parcimonie Faible → Forte **Exactitude** Faible → Forte **Précision** Faible → Forte **Spécialisation** Forte → Faible			

b. Flux d'énergie électrique **(FEE)**

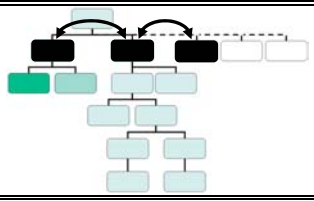
La capacité du bloc de batterie compense la consommation de l'ensemble des équipements électriques.

Tableau 3-11 : Modèle d'interaction au niveau 1 pour le flux d'énergie électrique

Niveau 1			Flux d'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE
VCo	**VCr**	**VI**	**Modèle d'interaction**
	C^0_{bbat}	C^0_{util}	$C^0_{bbat} = C^0_{util}$
Parcimonie Faible → Forte **Exactitude** Faible → Forte **Précision** Faible → Forte **Spécialisation** Forte → Faible			

c. Flux d'énergie mécanique (air) **(FEMA)**

Tableau 3-12 : Modèle d'interaction au niveau 1 pour le flux d'énergie mécanique (circulation de l'air)

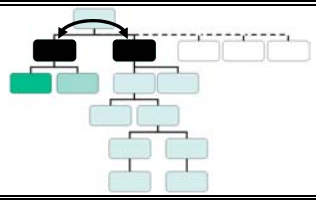
Niveau 1			Flux d'ÉNERGIE MÉCANIQUE (AIR)
VCo	**VCr**	**VI**	**Modèle d'interaction**
	$Q_{sventil}$, $\Delta P_{sventil}$, ΔP_{bbat}	Q_{bbat}	$Q_{sventil} = Q_{bbat}$, $\Delta P_{sventil} = \Delta P_{bbat}$
Parcimonie Faible → Forte **Exactitude** Faible → Forte **Précision** Faible → Forte **Spécialisation** Forte → Faible			

$Q_{sventil}$ est le débit d'air fourni par le système de ventilation et Q_{bbat} le débit d'air dans la batterie. Les pertes de charge dans la batterie sont compensées par la pression fournie par le système de ventilation (en négligeant celles du reste du système : pertes de charge régulières et singulières dans les conduites d'évacuation, changements de sections, etc.) (*cf.* tableau 3-12, page précédente).

d. Flux d'énergie mécanique (bruit) **(FEMB)**

Une variable critère permettant de qualifier la conception vis-à-vis du bruit total émis par le système est le niveau de puissance acoustique total. Il est donné par la somme des niveaux de puissance acoustique du système de ventilation et du bloc de la batterie [Bailly et al., 2001] (*cf.* tableau 3-13).

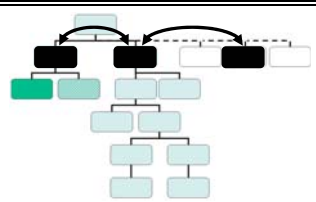
Tableau 3-13 : Modèle d'interaction au niveau 1 pour le flux d'énergie mécanique (bruit)

Niveau 1	Flux d'ÉNERGIE MÉCANIQUE (BRUIT)		
VCo	**VCr**	**VI**	**Modèle d'interaction**
	N^{dB} N^{dB}_{bbat}, $N^{dB}_{sventil}$		$N^{dB} = 10 \cdot log\left(10^{\frac{N^{dB}_{bbat}}{10}} + 10^{\frac{N^{dB}_{sventil}}{10}}\right)$
Parcimonie Faible → Forte **Exactitude** Faible → Forte **Précision** Faible → Forte **Spécialisation** Forte → Faible			

e. Flux de matière **(FM)**

La concentration en particules à l'entrée du bloc de la batterie est identique à la concentration en particules issues du système de ventilation pour chaque classe de particules (*cf.* tableau 3-14).

Tableau 3-14 : Modèle d'interaction au niveau 1 pour le flux de matière

Niveau 1	Flux de MATIÈRE		
VCo	**VCr**	**VI**	**Modèle d'interaction**
		$c^{p}_{sventil,s}$ (1), $c^{p}_{bbat,e}$ (1)	$\forall p \quad c^{p}_{sventil,s} = c^{p}_{bbat,e}$
Parcimonie Faible → Forte **Exactitude** Faible → Forte **Précision** Faible → Forte **Spécialisation** Forte → Faible			

(1) **(x nombre de classes de particules p)**

3 - II.2.8 Concaténation des modèles de niveau 1

La concaténation des modèles de composant (MC) et des modèles d'interaction (MI) de niveau 1 constitue un modèle de composant de niveau 0.

La plupart des variables critères de niveau 0 peuvent être évaluées directement à partir des variables critères de niveau 1, dont les valeurs sont pour la majorité d'entre elles imposées par le catalogue constructeur. Il est probable que le constructeur du bloc électrique fournisse également les valeurs de certaines variables comme la perte de charge au sein de la batterie pour un débit donné, ou un débit conseillé pour le fonctionnement en température de la batterie. En revanche, on ne peut pas à ce niveau déterminer les variables critères de niveau 0 retenues pour faire le choix de conception du bloc ni pour le flux d'énergie thermique (T_{max} et ΔT_{max}), ni pour le flux de matière (dont le critère d'appréciation est lié à la température maximale).

À l'échelle du bloc de la batterie, on peut écrire un modèle de composant pour le flux d'énergie thermique. La batterie en fonctionnement est une source de chaleur, qui est évacuée par échange par convection avec l'air dont le débit est fourni par le système de ventilation qui est connu. Si on suppose que la batterie est complètement isolée sur ses parois, la totalité de la puissance thermique fournie par la batterie est évacuée par l'air. On peut alors caractériser le comportement thermique du bloc électrique de la batterie à l'aide du modèle suivant, où $\dot{q}$ est directement proportionnel au nombre d'éléments dans le bloc (VI donnée constructeur) :

$$q_{air} \cdot Cp_{air} \cdot \left(T_{air,sort} - T_{air,ent}\right) = \dot{q}$$

Le modèle proposé permet de calculer la température de l'air en sortie de l'enceinte en fonction de certaines variables de conception (nombre d'éléments et de faisceaux) sans préjuger de choix de conception pour les éléments de batterie et quel que soit la géométrie de la batterie. Le modèle d'interaction proposé est donc très général (il faudrait évidemment évaluer son exactitude ainsi que sa précision). Les hypothèses faites pour écrire le modèle ne sont pas très restrictives. On a supposé d'une part, que la capacité calorifique massique de l'air était constante entre l'entrée et la sortie du bloc, d'autre part, qu'il n'y a qu'un seul écoulement d'air pour assurer le refroidissement de la batterie (un seul flux d'air en entrée et en sortie). De plus, on a supposé que l'enceinte du bloc de batterie n'échangeait pas de chaleur avec l'extérieur et que le comportement du système pouvait être limité à un modèle à deux dimensions. Par rapport aux objectifs de conception, le modèle est cependant trop général puisqu'il ne fait pas intervenir les variables critères de niveau 0 retenues pour la fonction contrainte SC1. Le modèle de composant à ce niveau ne permet pas de calculer la température au cœur des faisceaux, ni d'évaluer l'écart maximal de température entre les faisceaux. On pourrait, tout de même, connaissant la puissance à dissiper, estimer par expérience un intervalle de variation pour le coefficient d'échange global au sein de la batterie (règles métiers) et en déduire une température moyenne à cœur dans l'enceinte de la batterie, mais ce critère n'est pas satisfaisant du point de vue de la conception. Ce modèle complèterait le précédent mais ne permettrait pas de dimensionner la batterie dans la mesure où

il ne fait intervenir ni les variables critères, ni les variables de conception nécessaires. Nous ne retenons donc pas ce modèle.

Le risque de conception à ce niveau est lié à la précision et à l'exactitude du modèle, qui sont liées aux connaissances d'expertise du concepteur, mais également au fait que la conception est évaluée sur des critères qui diffèrent de ceux définis par le cahier des charges.

En outre, à ce niveau, les blocs fonctionnels choisis parmi des composants standard offrent un nombre limité de choix et donc de combinaisons possibles. Les choix sont à faire parmi un ensemble de valeurs discrètes tributaires des catalogues constructeur.

Le niveau 1 est insuffisant pour formaliser un modèle du système à concevoir : d'une part, parce que l'espace de recherche est restreint et limité aux configurations catalogue, d'autre part, le modèle ne fait pas apparaître les variables critères indiquées par le cahier des charges fonctionnel (VCr de niveau 0). À cette fin, nous devons descendre au niveau 2 de représentation du bloc électrique.

Nous ne considérons plus que la modélisation liée au flux d'énergie thermique dans le paragraphe suivant. Les hypothèses faites au niveau 1 ne seront pas répétées, on rappelle cependant qu'à tous les niveaux pour chaque modèle nous ferons les hypothèses suivantes : il n'y a pas de pertes de chaleur au travers des parois du bloc, on ne considérera qu'un seul flux d'air pour l'écoulement, et le modèle sera un modèle à deux dimensions quel que soit le niveau considéré.

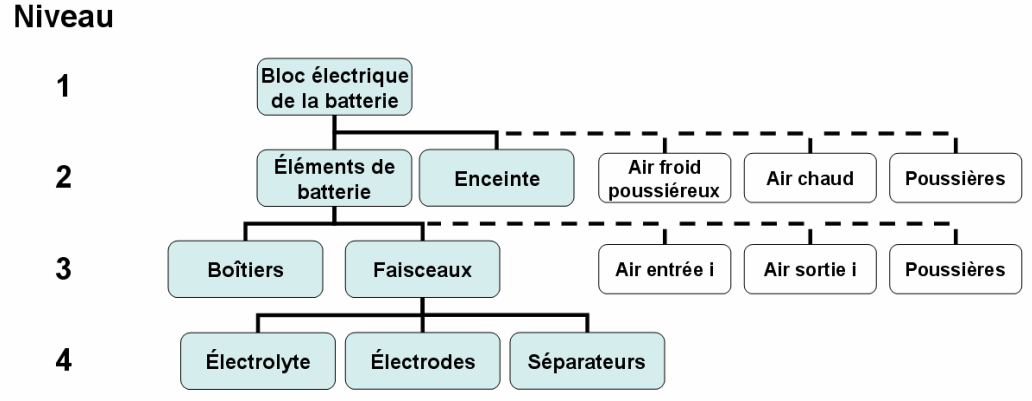


Figure 3-9 : Organigramme technique étendu du bloc électrique de la batterie

3 - II.3 Flux d'énergie thermique (FET)

3 - II.3.1 Descente au modèle de niveau 2

La décomposition fonctionnelle du bloc électrique de batterie est rappelée en figure 3-9, les composants et milieux extérieurs non concernés par le FET n'ont pas été représentés.

On veut proposer au niveau 2 un modèle de comportement thermique plus détaillé du bloc de la batterie en évaluant le flux d'énergie thermique échangé avec les éléments de batterie. L'agencement des éléments dans l'enceinte conditionne le modèle d'échange. Nous proposons le bloc diagramme fonc-

tionnel du bloc électrique au niveau 2 en figure 3-10, le diagramme figure l'agencement retenu pour les éléments de la batterie lors de la phase de recherche de concept. Le modèle est limité au concept de solution où les éléments de la batterie sont organisés en alignements. Le bloc fonctionnel de l'enceinte n'a qu'une fonction de positionnement et de maintien des éléments. Il n'est donc pas représenté sur le BDF, d'autant que le rayonnement thermique est négligé. Par conséquent, l'influence de l'enceinte n'intervient pas dans l'écriture du modèle d'interaction de niveau 2 pour le flux d'énergie thermique. On ne lui associe pas de variable.

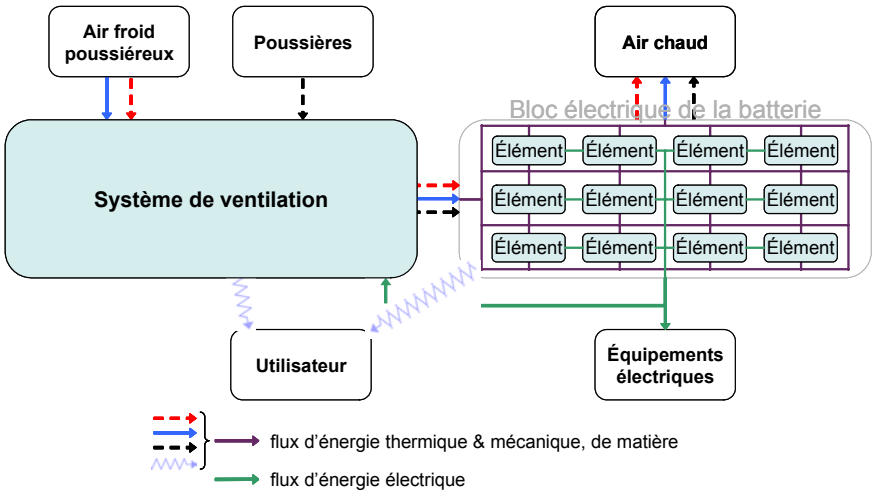
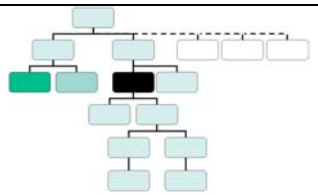


Figure 3-10 : Bloc diagramme fonctionnel du bloc électrique au niveau 2

On peut proposer à l'aide de la théorie des Nombres d'Unités de Transfert un modèle d'échange permettant de calculer la température moyenne, pour un « échangeur de chaleur » dont l'un des deux « fluides » est à température uniforme (température moyenne dans un élément). On fait l'hypothèse qu'il n'y a qu'un flux d'air unidirectionnel dans la batterie. Par symétrie, on en déduit que la température de l'air est la même quel que soit l'alignement considéré.

a. Modèle de composant

Tableau 3-15 : Modèle de composant d'un élément de batterie pour le flux d'énergie thermique (niveau 2)

Niveau 2	Élément		Flux d'ÉNERGIE THERMIQUE
VCo	VCr	VI	Modèle de composant
	$\overline{T^i_{élém}}$	$\overline{T^i_{paroi}}$	$\overline{T^i_{élém}} = \overline{T^i_{paroi}}$
Parcimonie Faible → Forte **Exactitude** Faible → Forte **Précision** Faible → Forte **Spécialisation** Forte → Faible			

b. Modèle d'interaction

Le modèle d'interaction au niveau 2 (figure 3-11) est un modèle d'interaction entre les éléments qui s'écrit sous la forme d'un bilan de conservation sur le flux d'énergie thermique pour l'air et d'un échange d'énergie thermique entre l'air et les éléments par les surfaces latérales (*cf.* tableau 3-16).

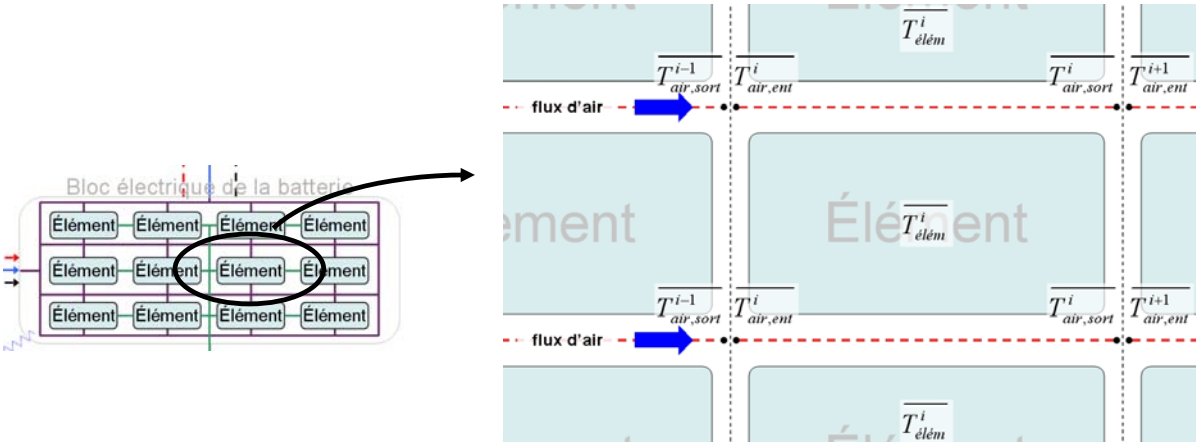


Figure 3-11 : Bloc diagramme fonctionnel de niveau 2 limité au FET (détail de la figure précédente)

h est évalué à l'aide de corrélations d'échanges issues d'expérimentations, ces corrélations dépendent du régime et de la géométrie d'écoulement, caractérisés par trois nombres adimensionnels (Nu, Pr, Re). On trouve dans des ouvrages spécialisés comme [Kays et London, 1998, Rohsenow et al., 1998] des corrélations pour la plupart des écoulements. Les hypothèses pour ce modèle sont : un agencement déterminé des éléments de batterie (donc une géométrie d'écoulement définie dans l'enceinte).

c. Concaténation des modèles de niveau 2, retour au niveau 1

Le modèle proposé, résultant de l'association des MC et du MI de niveau 2, est un modèle de composant de niveau 1 pour le bloc. On peut remarquer qu'il serait possible d'augmenter la parcimonie du modèle de niveau 1 obtenu en utilisant un coefficient d'échange moyen ce qui aurait pour conséquence de rendre le NUT constant pour chaque volume de contrôle de l'air et de simplifier la formalisation du modèle de niveau 1 en éliminant des VI.

Le MC obtenu permet d'évaluer la température moyenne dans chaque élément de la batterie, mais ne donne que peu d'information sur la répartition de la température au sein de l'enceinte. Par expérience, on sait que les éléments dont la température est maximale sont ceux dont l'indice est le plus élevé (*i.e.* à la sortie de l'air), mais leur température n'est qu'une température moyenne de l'ensemble des constituants d'un élément et peut ne pas convenir pour prédire les éventuels points chauds dans un élément de batterie. L'exactitude du modèle est donc à estimer afin de la comparer aux objectifs de conception. Si l'exactitude de ce modèle est insuffisante, le niveau de représentation utilisé n'est pas adapté.

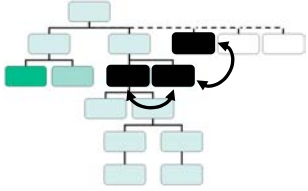
Par souci de lisibilité, nous utilisons dans la suite du document la notation suivante pour les corrélations utilisées dans les modèles de transfert thermique, elles sont identiques à celles du tableau précédent :

$$Nu = f\left(Re, Pr, e_{spac}, L_{élém}\right)$$

Tableau 3-16 : Modèle d'interaction du flux d'énergie thermique au niveau 2

Niveau 2			Flux d'ÉNERGIE THERMIQUE
VCo	**VCr**	**VI**	**Modèle d'interaction**
$n_{élém,l}$ $n_{élém,H}$ $l_{élém}$ $H_{élém}$ $L_{élém}$ e_{spac}	NUT^i (1) ε^i (1)	$\overline{T^i_{paroi}}$ (1) $T^i_{air,ent}$ (1) $T^i_{air,sort}$ (1) q_{air} $\rho_{air,ent}$ h^i (1) Q_{bbat} $T^{i-1}_{air,sort}$ (1) $A_{éch}$ Re (1) Pr (1) Nu (1) μ^i_{air} (1) Cp^i_{air} (1) λ^i_{air} (1) ρ^i_{air} (1) Π_t	• Bilan de conservation sur l'air : $\varepsilon^i = 1 - e^{-NUT^i}$ avec $NUT^i = \frac{h^i \cdot A_{éch}}{q_{air} \cdot Cp^i_{air}}$, $\varepsilon^i = \frac{T^i_{air,sort} - T^i_{air,ent}}{\overline{T^i_{paroi}} - T^i_{air,ent}}$ • Bilan enthalpique, conservation du débit : $q_{air} \cdot Cp^i_{air} \cdot \left(T^i_{air,sort} - T^i_{air,ent}\right) = \Pi_t \cdot L_{élém} \cdot H_{élém} \cdot l_{élém}$, $q_{air} = \frac{\rho_{air,ent} \cdot Q_{bbat}}{\left(n_{élém,l}+1\right) \cdot n_{élém,H}}$ • Condition aux limites : $T^i_{air,ent} = T^{i-1}_{air,sort}$ • Géométrie : $A_{éch} = 2 \cdot H_{élém} \cdot L_{élém}$ • Coefficients d'échange : $h^i = \frac{\lambda^i_{air} \cdot Nu}{2 \cdot e_{spac}}$, $Re = \frac{2 \cdot q_{air}}{\mu^i_{air} \cdot H_{élém}}$, $Pr = \frac{\mu^i_{air} \cdot Cp^i_{air}}{\lambda^i_{air}}$ • Corrélations [Rohsenow et al., 1998] : • $Re < 900 \Rightarrow Nu = 7{,}54$ • $900 < Re < 1100 \Rightarrow Nu = \frac{Nu_{max} - Nu_{min}}{1100-900}(Re - 900) + Nu_{min}$ avec $Nu_{min} = 7{,}54$, $Nu_{max} = 1{,}86 \cdot \left(Pr \cdot Re \cdot \frac{2 \cdot e_{spac}}{L_{élém}}\right)^{0,33}$ • $1100 < Re < 1900 \Rightarrow Nu = 1{,}86 \cdot \left(Pr \cdot Re \cdot \frac{2 \cdot e_{spac}}{L_{élém}}\right)^{0,33}$ • $1900 < Re < 2300 \Rightarrow Nu = \frac{Nu_{max} - Nu_{min}}{2300-1900}(Re - 1900) + Nu_{min}$ avec $Nu_{min} = 1{,}86 \cdot \left(Pr \cdot Re \cdot \frac{2 \cdot e_{spac}}{L_{élém}}\right)^{0,33}$, $Nu_{max} = 0{,}116 \cdot \left(Re^{0,66} - 125\right) \cdot Pr^{0,33}$ • $2300 < Re < 8000 \Rightarrow Nu = 0{,}116 \cdot \left(Re^{0,66} - 125\right) \cdot Pr^{0,33}$ • $8000 < Re < 10000 \Rightarrow Nu = \frac{Nu_{max} - Nu_{min}}{10000-8000}(Re - 8000) + Nu_{min}$ avec $Nu_{min} = 0{,}116 \cdot \left(Re^{0,66} - 125\right) \cdot Pr^{0,33}$, $Nu_{max} = 0{,}023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,33}$ • $10000 < Re < 10^6 \Rightarrow Nu = 0{,}023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,33}$

Parcimonie *Faible* → *Forte*
Exactitude *Faible* → *Forte*
Précision *Faible* → *Forte*
Spécialisation *Forte* → *Faible*



(1) (x nombre d'éléments dans la longueur)

Flux D'ÉNERGIE THERMIQUE

La concaténation des modèles de niveau 2, qui constitue un MC de niveau 1 ne permet pas de déterminer les variables critères de niveau 0 pour le flux d'énergie thermique. Afin de rester cohérent avec les objectifs de conception, il est nécessaire de formaliser un modèle plus détaillé et de descendre au niveau 3.

Nous faisons le choix de formaliser le modèle en descendant plus bas dans les niveaux de représentation, afin de faire apparaître les matériaux constituants des faisceaux et des modules comme des variables de conception (*cf.* figure 3-9). Pour la suite du document, nous allons schématiser les éléments de batterie ainsi que les faisceaux comme indiqué sur la figure 3-12. Cette figure montre le choix de concept de solution retenu pour les éléments de batterie. On peut noter que l'on spécialise nécessairement le modèle à ce concept de solution. Ceci est dû au fait de descendre dans les niveaux de représentation, ce que nous avions déjà évoqué dans le chapitre exposant la démarche.

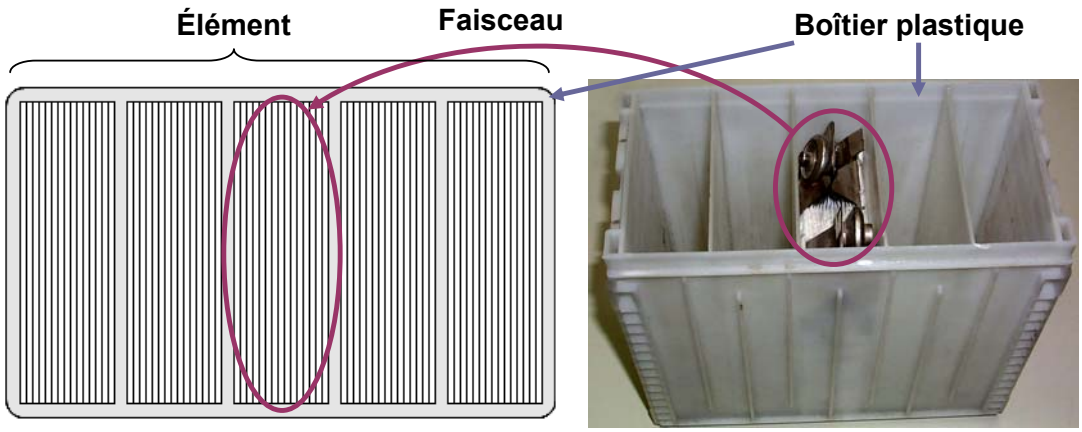


Figure 3-12 : Schématisation d'un élément de batterie et des faisceaux

3 - II.3.2 Descente au modèle de niveau 3

L'OTe et le BDF au niveau 3 d'un élément de batterie (*cf.* figure 3-13) font apparaître la nécessité de formaliser un modèle de composant pour le bloc fonctionnel du faisceau et un modèle d'interaction pour le flux d'énergie thermique. En toute rigueur, il faudrait également formaliser un modèle de composant pour le boîtier et deux modèles d'interaction : entre le boîtier et le faisceau et entre le boîtier et l'air ; cependant, nous intégrons directement ces modèles dans le modèle d'interaction entre l'air et le faisceau.

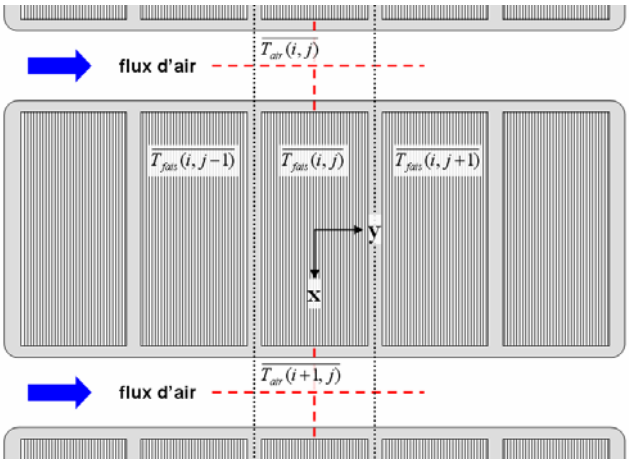
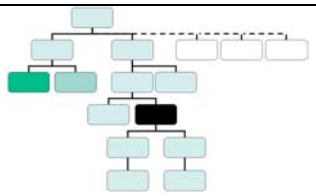


Figure 3-13 : Bloc diagramme fonctionnel de niveau 3 d'un élément de batterie (FET uniquement)

a. Modèle de composant

Pour un faisceau que l'on repère dans un alignement i comme le j^{ième} faisceau, on écrit le modèle de composant.

Tableau 3-17 : Modèle de composant d'un faisceau pour le flux d'énergie thermique (niveau 3)

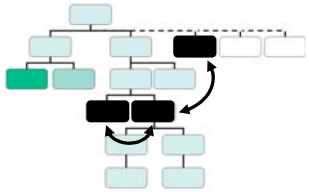
Niveau 3	Faisceau (i,j)		Flux d'ÉNERGIE THERMIQUE
VCo	**VCr**	**VI**	**Modèle de composant**
	$\overline{T_{fais}(i,j)}$	$\overline{T_{paroi}(i,j)}$	$\overline{T_{fais}(i,j)} = \overline{T_{paroi}(i,j)}$
Parcimonie Faible → Forte **Exactitude** Faible → Forte **Précision** Faible → Forte **Spécialisation** Forte → Faible			

b. Modèle d'interaction

Nous faisons les hypothèses suivantes :

- la puissance thermique produite par les faisceaux est intégralement évacuée par l'air,
- les parois en plastique qui séparent les faisceaux sont considérées comme adiabatiques,
- l'écoulement d'air est toujours considéré comme unidimensionnel,
- entre chaque alignement, la température dans un volume élémentaire représentatif d'air de même largeur qu'un faisceau ainsi que la température de paroi sont considérées comme uniformes,
- la hauteur d'un élément est identique à la hauteur d'un faisceau.

Tableau 3-18 : Modèle d'interaction pour le flux d'énergie thermique (niveau 3)

Niveau 3	Flux d'ÉNERGIE THERMIQUE		
VCo	**VCr**	**VI**	**Modèle d'interaction**
e_{spac} $n_{élém,l}$ $n_{élém,H}$ $H_{élém}$ l_{fais} L_{fais} e_p	$\dfrac{T_{paroi}(i,j)}{T_{paroi}(i-1,j)}$	$\overline{T_{air}(i,j)}$ (1) $\overline{T_{air}(i,j-1)}$ (1) $Cp_{air}(i,j-1)$ (1) $Cp_{air}(i,j)$ (1) q_{air} , $\rho_{air,ent}$ Q_{bbat} , A_{ech} Vol_{fais} $k(i,j)$ (1) $k(i-1,j)$ (1) $h(i,j)$ (1) $Nu(i,j)$ (1) $\lambda_{air}(i,j)$ (1) $Re(i,j)$ (1) $Pr(i,j)$ (1) $\mu_{air}(i,j)$ (1) h_{interf} , λ_p Π_t , i , j	• Bilan de conservation sur l'air : $q_{air}\cdot Cp_{air}(i,j)\cdot\overline{T_{air}(i,j)} = q_{air}\cdot Cp_{air}(i,j-1)\cdot\overline{T_{air}(i,j-1)} + 2A_{ech}\cdot k(i,j)\cdot\left(\dfrac{\overline{T_{paroi}(i-1,j)}+\overline{T_{paroi}(i,j)}}{2} - \overline{T_{air}(i,j)}\right)$ • Bilan enthalpique : $A_{ech}\cdot k(i,j)\cdot\left(\overline{T_{paroi}(i,j)} - \overline{T_{air}(i,j)}\right) + A_{ech}\cdot k(i-1,j)\cdot\left(\overline{T_{paroi}(i,j)} - \overline{T_{air}(i-1,j)}\right) = \Pi_t\cdot Vol_{fais}$ • Géométrie : $A_{éch} = l_{fais}\cdot H_{élém}$, $Vol_{fais} = H_{élém}\cdot l_{fais}\cdot L_{fais}$ • Conservation du débit : $q_{air} = \dfrac{\rho_{air,ent}\cdot Q_{bbat}}{(n_{élém,l}+1)\cdot n_{élém,H}}$ • Coefficients d'échange : $k(i,j) = \dfrac{1}{\dfrac{1}{h(i,j)} + \dfrac{1}{h_{interf}} + \dfrac{e_p}{\lambda_p}}$, $h(i,j) = \dfrac{\lambda_{air}(i,j)\cdot Nu(i,j)}{2\cdot e_{spac}}$ $Re(i,j) = \dfrac{2\cdot q_{air}}{\mu_{air}(i,j)\cdot H_{élém}}$, $Pr(i,j) = \dfrac{\mu_{air}(i,j)\cdot Cp_{air}(i,j)}{\lambda_{air}(i,j)}$ • Corrélations : $Nu(i,j) = f\left(Re(i,j), Pr(i,j), e_{spac}, l_{fais}\right)$
Parcimonie Faible → Forte **Exactitude** Faible → Forte **Précision** Faible → Forte **Spécialisation** Forte → Faible			

(1) (x nombre de faisceaux)

h(i,j) est le coefficient d'échange convectif entre l'air et la paroi du boîtier, il est déterminé par l'intermédiaire de corrélations [Rohsenow et al., 1998], h dépend de i et de j, car les variables intermédiaires dépendent de la température de l'air ($T_{air}(i,j)$).

Le terme e_p/λ_p caractérise le flux d'énergie thermique par conduction à travers le boîtier.

h_{interf} traduit l'échange entre l'épaisseur du plastique du boîtier et l'extrémité du faisceau, ce coefficient est évalué par identification et présente une incertitude, elle traduit des effets complexes d'évaporation-condensation de l'électrolyte et éventuellement de rayonnement.

On peut noter qu'il était possible d'utiliser encore une fois un modèle d'interaction à l'aide de la théorie des NUT, mais la taille des volumes de contrôle permet d'utiliser un modèle linéarisé tel qu'on l'a écrit. L'exactitude des deux modèles n'aurait pas été la même.

c. Concaténation des MC et MI de niveau 3, retour au niveau 2

Étant donné l'hypothèse faite sur l'écoulement d'air, on peut déduire du modèle proposé une variable critère à partir des variables critères du modèle proposé. En effet, on sait que la température dans un faisceau est maximale à la sortie de l'air et minimale à l'entrée de l'air dans l'enceinte. On peut donc déterminer une variable critère de niveau 0 à partir des variables critères du modèle de niveau 3. Cependant, la variable critère de niveau 3 est une température moyennée sur un faisceau qui ne tient pas compte des gradients de température dans le faisceau. Il est donc nécessaire de s'interroger sur la validité de ce critère et si ce modèle convient pour l'utilisation qu'on souhaite en faire, notamment en comparant le PEPS du modèle obtenu aux objectifs de conception.

Flux D'ÉNERGIE THERMIQUE

La parcimonie du modèle concaténé, issu des modèles de composants et d'interaction de niveau 3, est faible, puisqu'on a introduit beaucoup de variables intermédiaires en augmentant le niveau de détail du système. On peut déterminer une variable critère de niveau 0 à l'aide du modèle concaténé au niveau 2, mais l'exactitude de ce modèle est insuffisante, car il définit une température moyenne. Enfin, le modèle de composant pour le faisceau ne fait pas intervenir les variables de conception associées au choix de matériau pour les électrodes, le séparateur, l'électrolyte. Nous descendons donc au niveau 4.

3 - II.3.3 Descente aux modèles de niveau 4

a. Analyse

Un faisceau est constitué d'une alternance d'électrodes négatives et positives séparées d'un papier isolant poreux imbibé d'un électrolyte. Les modèles de composants sont limités au comportement thermique de chaque électrode ou séparateur, que nous nommons indistinctement « feuilles ». Pour le volume élémentaire considéré, c'est-à-dire une feuille, on écrit le modèle de comportement pour le flux d'énergie thermique ainsi que le modèle d'interaction entre les feuilles et avec le boîtier. Nous ne distinguons pas du point de vue du flux d'énergie thermique les blocs fonctionnels des séparateurs et de l'électrolyte dans la mesure où les séparateurs sont imbibés d'électrolyte. À ce stade de la conception, il n'est pas nécessaire de connaître la valeur de variables locales en se plaçant à l'échelle des porosités et en

discernant la température dans l'électrolyte de la température dans le séparateur. Si on se limite au flux d'énergie thermique, l'OTe à ce niveau est alors celui représenté en figure 3-14. Le bloc diagramme fonctionnel de niveau 4 est représenté en figure 3-15.

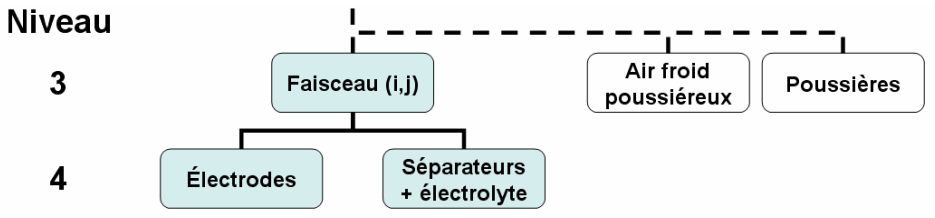


Figure 3-14 : Organigramme technique étendu du faisceau

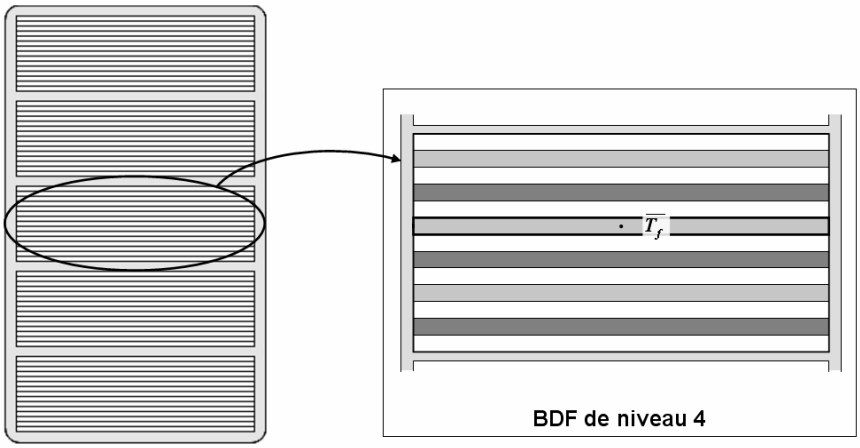
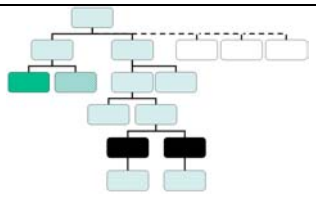


Figure 3-15 : Bloc diagramme fonctionnel de niveau 4 du faisceau (à droite) pour le FET seul

b. Modèles de composant

Tableau 3-19 : Modèle de composant d'une feuille pour le flux d'énergie thermique (niveau 4)

Niveau 4	Feuille f		Flux d'ÉNERGIE THERMIQUE
VCo	**VCr**	**VI**	**Modèle de composant**
	$\overline{T_f}$ (1)		$\overline{T_f} = T_f$
Parcimonie Faible → Forte **Exactitude** Faible → Forte **Précision** Faible → Forte **Spécialisation** Forte → Faible			

(1) (x nombre de feuille f)

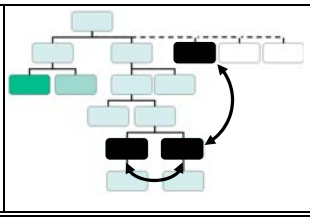
c. Modèles d'interaction

On écrit le modèle d'interaction entre les feuilles en faisant un bilan de conservation de l'énergie thermique sur une feuille et en linéarisant les échanges par conduction entre les feuilles (*cf.* tableau 3-20).

Tableau 3-20 : Modèle d'interaction pour le flux d'énergie thermique au niveau 4

Niveau 4		**Flux d'ÉNERGIE THERMIQUE**	
VCo	**VCr**	**VI**	**Modèle d'interaction**
Dimensions d'une feuille : e^f , L Matériau e_{spac} $n_{élém,l}$ $n_{élém,H}$ $H_{élém}$ l_{fais} L_{fais} e_p	T_f (1)	$T_{air}^f(i,j)$ (1) $T_{air}^f(i,j-1)$ (1) $Cp_{air}^f(i,j-1)$ (1) $Cp_{air}^f(i,j)$ (1) q_{air} , $\rho_{air,ent}$ Q_{bbat} , A_{ech} Vol_{VER}^f (1), $k^f(i,j)$ (1) $k^f(i-1,j)$ (1), $h^f(i,j)$ (1) $Nu^f(i,j)$ (1), $\lambda_{air}^f(i,j)$ (1) $Re^f(i,j)$ (1), $Pr^f(i,j)$ (1) $\mu_{air}^f(i,j)$ (1) h_{interf} , λ_p Π_t , i , j λ^f (1), λ^{f-1} (1) λ^{f+1} (1), a^{f-1} (1) a^{f+1} (1), f (1)	• Bilan de conservation sur la feuille : $$T^f = \frac{e^f \cdot k^f(i,j) \cdot T_{air}^f(i,j) + e^f \cdot k^f(i+1,j) \cdot T_{air}^f(i+1,j) + \frac{2 \cdot \lambda^f \cdot L}{e^f}\left(a^{f-1} \cdot T^{f-1} + a^{f+1} \cdot T^{f+1}\right) + \Pi_t \cdot}{e^f \cdot k^f(i,j) + e^f \cdot k^f(i+1,j) + \frac{2 \cdot \lambda^f \cdot L}{e^f}\left(a^{f-1} + a^{f+1}\right)}$$ avec $a^{f-1} = \frac{e^{f-1} \cdot \lambda^{f-1}}{e^f \cdot \lambda^f + e^{f-1} \cdot \lambda^{f-1}}$ $a^{f+1} = \frac{e^{f+1} \cdot \lambda^{f+1}}{e^f \cdot \lambda^f + e^{f+1} \cdot \lambda^{f+1}}$ • Bilan de conservation sur l'air : $$q_{air} \cdot Cp_{air}^f(i,j) \cdot T_{air}^f(i,j) = q_{air} \cdot Cp_{air}^f(i,j-1) \cdot T_{air}^f(i,j-1) + 2 \cdot A_{ech} \cdot k^f(i,j) \cdot \left(\frac{T^f(i-1,j) + T^f(i,j)}{2} - T_{air}^f(i,j)\right)$$ • Bilan enthalpique : $$A_{ech} \cdot k^f(i,j) \cdot \left(T^f(i,j) - T_{air}^f(i,j)\right) + A_{ech} \cdot k^f(i-1,j) \cdot \left(T^f(i,j) - T_{air}^f(i-1,j)\right) = \Pi_t \cdot Vol_{VER}^f$$ • Géométrie : $A_{ech} = H_{élém} \cdot e^f$, $Vol_{VER}^f = L_{fais} \cdot H_{élém} \cdot e^f$ • Conservation du débit : $q_{air} = \frac{\rho_{air,ent} \cdot Q_{bbat}}{\left(n_{élém,l} + 1\right) \cdot n_{élém,H}}$ • Coefficients d'échange : $$k^f(i,j) = \frac{1}{\frac{1}{h^f(i,j)} + \frac{1}{h_{interf}} + \frac{e_p}{\lambda_p}}, \quad h^f(i,j) = \frac{\lambda_{air}^f(i,j) \cdot Nu^f(i,j)}{2 \cdot e_{spac}}$$ $$Re^f(i,j) = \frac{2 \cdot q_{air}}{\mu_{air}^f(i,j) \cdot H_{élém}}, \quad Pr(i,j) = \frac{\mu_{air}^f(i,j) \cdot Cp_{air}^f(i,j)}{\lambda_{air}^f(i,j)}$$ • Corrélations : $$Nu^f(i,j) = f\left(Re^f(i,j), Pr^f(i,j), e_{spac}, e^f\right)$$	

Parcimonie Faible ⟶ Forte
Exactitude Faible ⟶ Forte
Précision Faible ⟶ Forte
Spécialisation Forte ⟶ Faible



(1) **(x nombre total de feuilles f)**

d. Concaténation des modèles de niveau 4

Le modèle de niveau 3 issu de la concaténation des modèles de niveau 4 offre plus de connaissances sur le comportement thermique du bloc de la batterie puisqu'on a accès à l'aide de ces modèles à la température dans les électrodes et les feuilles de séparateur. Il est cependant fortement critiquable puisque la parcimonie du modèle obtenu grâce à ces modèles élémentaires est très faible. On a autant de variables de température que de feuilles constituant les faisceaux. On a donc $n_{élém,l} \cdot n_{élém,L} \cdot n_{élém,H} \cdot n_{fais} \cdot n_{feuil}$ variables critères pour ce modèle ($n_{élém,l}$, $n_{élém,H}$: nombre d'alignements en largeur, en hauteur, $n_{élém,L}$: nombre d'éléments par alignement, n_{fais} : nombre de faisceaux par élément, n_{feuil} : nombre de feuilles par faisceau) nombre auquel il faut ajouter les variables intermédiaires.

Enfin, si on peut distinguer des écarts de température du fait du raffinement de la représentation du système, ils ne sont pas réellement représentatifs des gradients internes de température. En effet, les plus forts gradients de température pour une feuille sont dans le sens de l'axe x (figure 3-13), or les variables critères utilisées occultent totalement ce gradient. On se propose d'affiner le niveau de détail du modèle afin de faire apparaître des variables cohérentes avec les objectifs de conception et le comportement du système en discrétisant les feuilles constituant les faisceaux dans le sens des gradients de température (suivant l'axe x).

Flux D'ÉNERGIE THERMIQUE

La parcimonie du modèle résultant de la concaténation des MC et MI de niveau 4 est très faible. En outre, ce modèle de niveau 3, même s'il est plus détaillé que le modèle précédent ne rend pas compte des réels gradients thermiques au sein d'un faisceau. On cherche donc à formaliser des MC et MI au niveau 5.

Au niveau 5, les blocs fonctionnels ne sont plus à proprement parler ni des composants, ni des blocs fonctionnels, ce sont des Volumes Élémentaires Représentatifs (VER) (*cf.* figure 3-16).

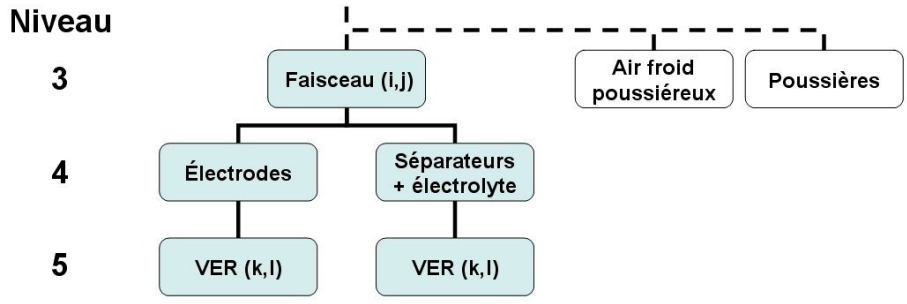


Figure 3-16 : Organigramme technique étendu du faisceau

3 - II.3.4 Descente aux modèles de niveau 5

a. Analyse

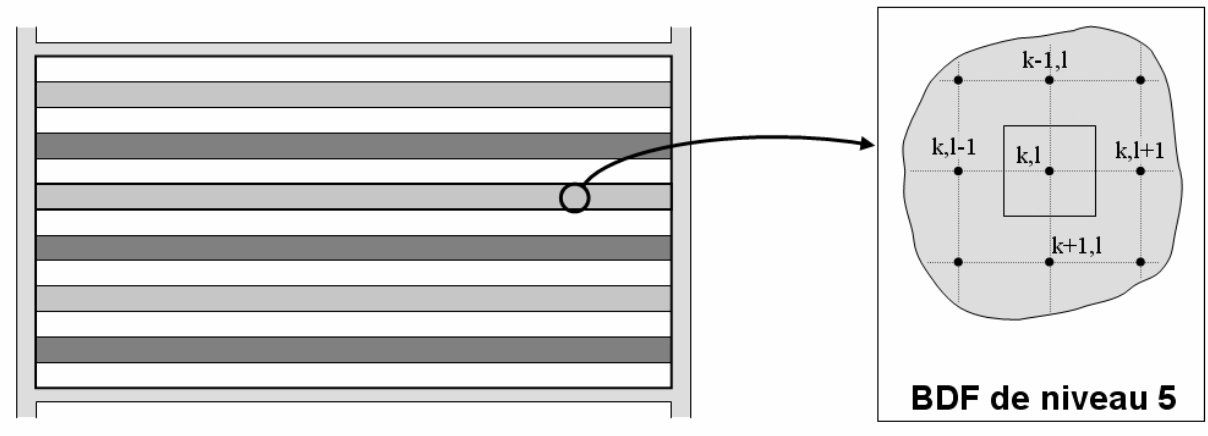


Figure 3-17 : Bloc diagramme fonctionnel de niveau 5 (à droite) ; FET uniquement

On a représenté le BDF au niveau 5 en figure 3-17. Le modèle d'interaction entre les éléments de volume consiste à faire le bilan de conservation sur le volume VER(k,l) à l'aide des différences finies. Selon les cas le modèle d'interaction n'est pas le même (figure 3-18).

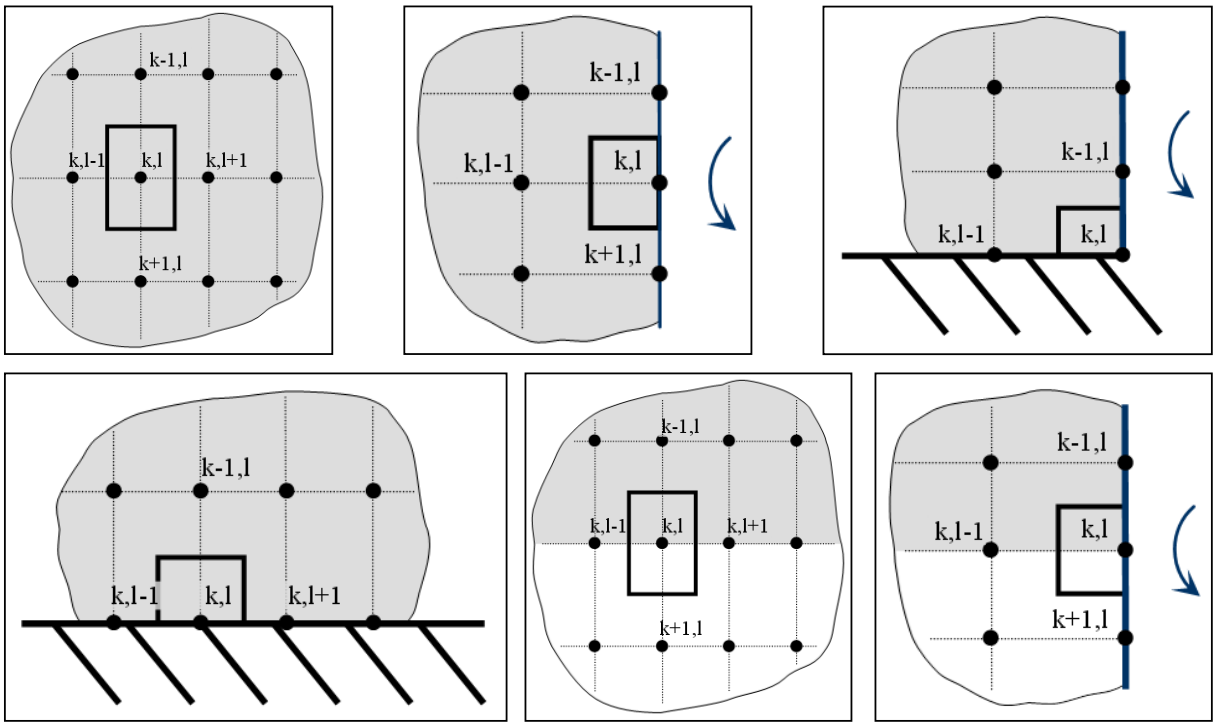
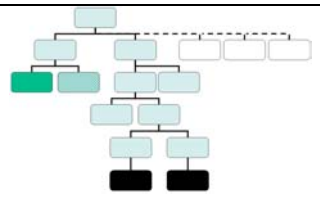


Figure 3-18 : Les différents modèles d'interaction de niveau 5 pour le flux d'énergie thermique

b. Modèles de composant

Tableau 3-21 : Modèle de composant de niveau 5 (ver (k,l))

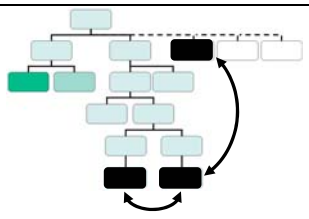
Niveau 5	VER(k,l)		Flux d'ÉNERGIE THERMIQUE
VCo	**VCr**	**VI**	**Modèle de composant**
	$T_{k,l}$ (1)	k, l	$T_{k,l}$ $k \in [1,m]$ $l \in [1,n]$
Parcimonie Faible → Forte			
Exactitude Faible → Forte			
Précision Faible → Forte			
Spécialisation Forte → Faible			

(1) (x nombre de VER(k,l))

c. Modèles d'interaction

On écrit les modèles d'interaction entre les éléments de volume en faisant un bilan de conservation sur l'élément de volume et en utilisant les différences finies. Les modèles d'interaction à ce niveau dépendent de l'endroit où est situé l'élément de volume et des conditions aux limites. Les autres cas sont consignés en annexe 2. Par souci de clarté, nous n'avons pas reporté tous les indices (i,j) qui sont donc sous-entendus.

Tableau 3-22 : Modèle d'interaction pour le flux d'énergie thermique (niveau 5)

Niveau 5			Flux d'ÉNERGIE THERMIQUE
VCo	**VCr**	**VI**	**Modèle d'interaction**
	$T_{k,l}$ (1)	$T_{k-1,l}$ (1), $T_{k+1,l}$ (1), $T_{k,l-1}$ (1) $T_{k,l+1}$ (1), Π_t, λ_k (1) Δx, Δy, k, l	$T_{k,l} = \dfrac{\dfrac{\Delta x}{\Delta y}\cdot\dfrac{(T_{k-1,l}+T_{k+1,l})}{2} + \dfrac{\Delta y}{\Delta x}\cdot\dfrac{(T_{k,l+1}+T_{k,l-1})}{2} + \dfrac{\Pi_t\cdot\Delta x\cdot\Delta y}{2\cdot\lambda_k}}{\dfrac{\Delta x}{\Delta y}+\dfrac{\Delta y}{\Delta x}}$ (1)
Parcimonie Faible → Forte			
Exactitude Faible → Forte			
Précision Faible → Forte			
Spécialisation Forte → Faible			

(1) (x nombre de VER(k,l))

Selon la position du volume élémentaire, les modèles d'interaction ne font pas intervenir le même nombre de variables intermédiaires. Le modèle concaténé de l'ensemble de ces modèles d'interaction est très peu parcimonieux, puisque chacun de ces modèles fait intervenir un grand nombre de variables intermédiaires.

d. Concaténation des modèles de niveau 5

Le modèle de niveau 4 obtenu par l'association des MC et du MI de niveau 5 est très peu parcimonieux. En descendant dans les niveaux systémiques, on a une nouvelle fois considérablement altéré la parcimonie du modèle qui est nettement inférieure au niveau précédent en multipliant le nombre de variables et d'équations. Un modèle aussi peu parcimonieux nécessite un coût de traitement numérique très important qui n'est pas adapté à la conception préliminaire.

Flux D'ÉNERGIE THERMIQUE

Les MC et les MI formalisés au niveau 5 sont des modèles très généraux, ils sont issus de lois physiques qu'on peut écrire pour n'importe quel volume élémentaire. En revanche, le fait de concaténer ces modèles afin de formaliser un modèle de composant au niveau 4 impose de définir un arrangement et conduit à une spécialisation du modèle.

Ce modèle peu parcimonieux et spécialisé doit être adapté par simplification ou intégration.

3 - II.3.5 Adaptation du modèle de niveau 5

Le composant au niveau systémique considéré (**niveau 4**) est un volume élémentaire (*cf.* figure 3-19) qui ne correspond à aucun composant physique.

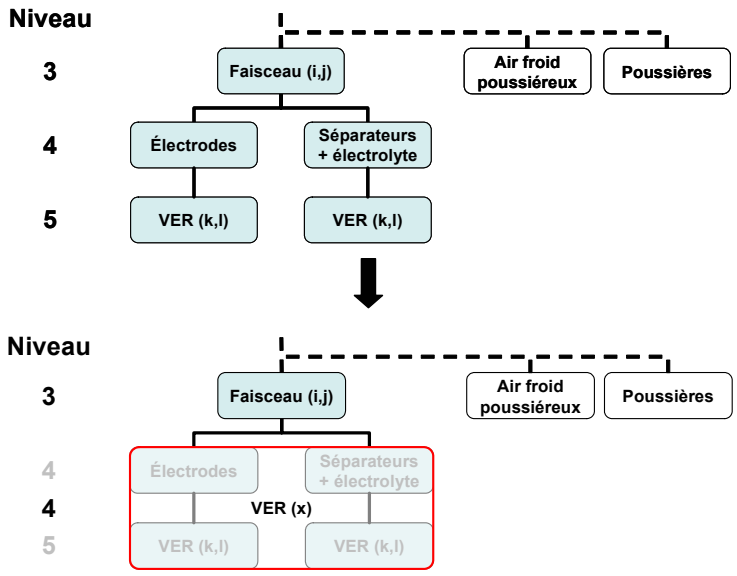


Figure 3-19 : Homogénéisation des volumes élémentaires de niveau 5

On fait l'hypothèse que les faisceaux sont constitués d'un matériau homogène, dont on peut calculer une conductivité thermique équivalente $\lambda_{éq}$ en considérant la température comme moyenne dans une section *dx* du faisceau. La température est donc supposée uniforme dans chaque section *dx* du faisceau (*cf.* figure 3-20). On adapte donc le modèle de niveau 5.

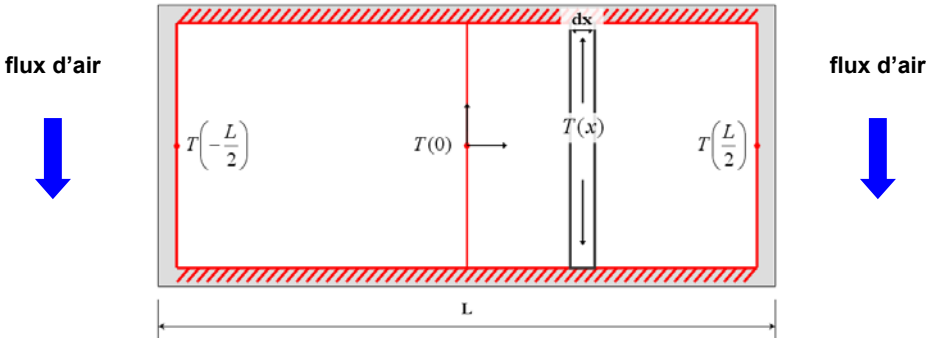
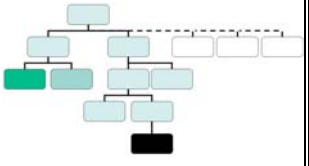


Figure 3-20 : Volume élémentaire représentatif considéré pour le modèle adapté de composant au niveau 4

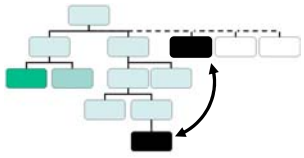
a. Modèle de composant de niveau 4

Tableau 3-23 : Modèle de composant adapté, niveau 4 (VER (x))

Niveau 4	**VER(x)**	**Flux d'ÉNERGIE THERMIQUE**	
VCo	**VCr**	**VI**	**Modèle de composant**
• électrode + : _ matériau, épaisseur, nombre • électrode - : _ matériau, épaisseur, nombre • séparateur : _ matériau, épaisseur, nombre • solution électrolytique : matériau, fraction massique dans le séparateur e_{el+}, n_{el+}, n_{el-}, e_{el-}, n_{sep}, e_{sep}, χ	$T(x)$	$\lambda_{él+}$ $\lambda_{él-}$ λ_{sol} λ_{sep} $\lambda_{éq}$	$T(x)$ $\lambda_{éq} = \frac{n_{el+}\cdot\lambda_{el+}\cdot e_{el+} + n_{el-}\cdot\lambda_{el-}\cdot e_{el-} + n_{sep}\cdot\left(\lambda_{sol}\cdot\chi + \lambda_{sep}\cdot(1-\chi)\right)\cdot e_{sep}}{n_{el+}\cdot e_{el+} + n_{el-}\cdot e_{el-} + n_{sep}\cdot e_{sep}}$
Parcimonie Faible → Forte **Exactitude** Faible → Forte **Précision** Faible → Forte **Spécialisation** Forte → Faible			

b. Modèle d'interaction de niveau 4

Tableau 3-24 : Nouveau modèle d'interaction au niveau 4

Niveau 4	Flux d'ÉNERGIE THERMIQUE	
VI	Modèle d'interaction	
Π_t , $\lambda_{éq}$	$\lambda_{éq} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \Pi_t = 0$	
Parcimonie Faible → Forte **Exactitude** Faible → Forte **Précision** Faible → Forte **Spécialisation** Forte → Faible		

c. Concaténation des modèles de niveau 4

Le modèle de niveau 4 obtenu n'est pas adapté à l'outil de traitement utilisé (solveur PSC numérique), car il inclut une équation différentielle. On cherche à adapter le modèle de niveau 4, en intégrant l'équation différentielle. Cette intégration va permettre de formaliser un modèle de composant au niveau 3 résultant du MC et du MI de niveau 4, mais va également obliger à spécialiser le modèle de niveau 3 à une configuration précise.

3 - II.3.6 Formalisation d'un modèle de composant pour le faisceau (niveau 3)

a. Modèle de composant adapté

On fait un bilan thermique sur un faisceau (il est représenté en blanc entouré de hachures sur la figure 3-20), en intégrant analytiquement le modèle adapté de niveau 4. On peut déduire de cette intégration un modèle de composant faisant apparaître des variables critères cohérentes avec les variables critères de niveau 0 (*cf.* tableau 3-25, page suivante).

b. Modèle d'interaction

Pour le volume élémentaire représentatif VER considéré, on écrit le modèle d'interaction entre l'air et un faisceau (*cf.* figure 3-13). On fait l'hypothèse suivante sur l'écoulement d'air : il n'existe qu'un flux d'entrée d'air. L'écoulement est donc unidimensionnel et se fait le long des alignements d'éléments de batterie. Par symétrie, la température à l'extrémité de chaque faisceau est uniforme sur la section d'échange. Le flux traversant les surfaces latérales est identique pour chaque faisceau. On a donc :

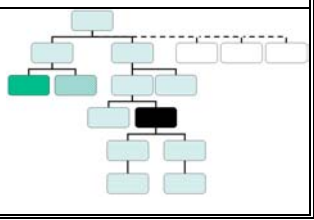
$$T\left(\frac{L}{2}\right) = T\left(-\frac{L}{2}\right)$$

On ne considère pas d'échange par rayonnement. La température de l'air est uniforme sur la largeur de la section d'échange. On en déduit le modèle d'interaction pour le flux d'énergie thermique au niveau 3 (*cf.* tableau 3-26, page de droite).

Tableau 3-25 : Modèle adapté du faisceau pour le flux d'énergie thermique (niveau 3)

Niveau 3	**Faisceau (i,j)**	**Flux d'ÉNERGIE THERMIQUE**

VCo	**VCr**	**VI**	**Modèle de composant**
• largeur du faisceau • électrode + : _ matériau, épaisseur, nombre • électrode - : _ matériau, épaisseur, nombre • séparateur : _ matériau, épaisseur • solution électrolytique : matériau, fraction massique dans le séparateur e_{el+}, n_{el+}, n_{el-}, e_{el-}, n_{sep}, e_{sep}, χ, L	$T_{\max}$ (1)	$T\left(\frac{L}{2}\right)$ (1) $T\left(-\frac{L}{2}\right)$ (1) Π_t $\lambda_{él+}$ $\lambda_{él-}$ λ_{sol} λ_{sep} $\lambda_{éq}$	$T_{max} = \frac{2\lambda_{éq}}{\Pi_t}\frac{\left(T\left(\frac{L}{2}\right)-T\left(-\frac{L}{2}\right)\right)^2}{L^2} + \frac{T\left(\frac{L}{2}\right)+T\left(-\frac{L}{2}\right)}{2} + \frac{\Pi_t}{\lambda_{éq}}\frac{L^2}{8}$ $\lambda_{éq} = \frac{n_{el+}\cdot\lambda_{el+}\cdot e_{el+} + n_{el-}\cdot\lambda_{el-}\cdot e_{el-} + n_{sep}\cdot\left(\lambda_{sol}\cdot\chi + \lambda_{sep}\cdot(1-\chi)\right)\cdot e_{sep}}{n_{el+}\cdot e_{el+} + n_{el-}\cdot e_{el-} + n_{sep}\cdot e_{sep}}$

Parcimonie	*Faible*	*Forte*	
Exactitude	*Faible*	*Forte*	
Précision	*Faible*	*Forte*	
Spécialisation	*Forte*	*Faible*	

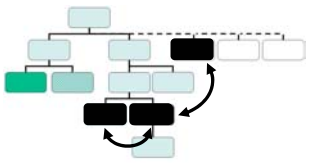
(1) (x nombre de faisceaux)

c. Concaténation des modèles adaptés de niveau 3

Flux D'ÉNERGIE THERMIQUE

On a formalisé, grâce à l'adaptation des modèles précédents, un modèle de composant du faisceau de niveau 3 dont la variable critère est cohérente avec le cahier des charges. On peut associer les MC et le MI de niveau 3 pour formaliser directement un MC du bloc au niveau 1, ou écrire un modèle de composant au niveau 2 (MC d'un élément) et un modèle d'interaction entre les éléments pour ensuite en déduire un MC du bloc au niveau 1. Dans la section suivante nous donnons un MC du bloc issu de la concaténation des modèles de niveau 3.

Tableau 3-26 : Modèle d'interaction pour le flux d'énergie thermique (niveau 3)

Niveau 3		Flux d'ÉNERGIE THERMIQUE	
VCo	**VCr**	**VI**	**Modèle d'interaction**
L $n_{élém,l}$ e_{spac} $n_{élém,H}$ $H_{élém}$ l_{fais} e_p		T_{air}^{j+1} , T_{air}^{j} $q_{air,espac}$, Cp_{air}^{j} Π_t $A_{éch}$ $T^j\left(\frac{L}{2}\right)$ k^j $\rho_{air,ent}$, Q_{bat} h_{interf} , h^j λ_p , $\lambda_{air}{}^j$ Nu^j , Re^j $\mu_{air}{}^j$, Pr^j	• Bilan de conservation sur l'air : $T_{air}^{j+1} - T_{air}^{j} = \frac{\Pi_t \cdot L \cdot A_{éch}}{2 \cdot q_{air,espac} \cdot Cp_{air}^{j}}$ • Bilan enthalpique : $T^j\left(\frac{L}{2}\right) - T_{air}^{j} = \frac{\Pi_t \cdot L}{2 \cdot k^j}$ • Conservation du débit : $q_{air,espac} = \frac{\rho_{air,ent} \cdot Q_{bat}}{(n_{élém,l}+1) \cdot n_{élém,H}}$ • Géométrie : $A_{éch} = 2 \cdot l_{fais} \cdot H_{élém}$ • Coefficients d'échange : $k^j = \frac{1}{\frac{1}{h^j} + \frac{1}{h_{interf}} + \frac{e_p}{\lambda_p}}$, $h^j = \frac{\lambda_{air}{}^j \cdot Nu^j}{2 \cdot e_{spac}}$ $Re^j = \frac{2 \cdot q_{air,espac}}{\mu_{air}{}^j \cdot H_{élém}}$, $Pr^j = \frac{\mu_{air}{}^j \cdot Cp_{air}{}^j}{\lambda_{air}{}^j}$ • Corrélations : $Nu^j = f\left(Re^j, Pr^j, e_{spac}, l_{fais}\right)$
Parcimonie Faible → Forte **Exactitude** Faible → Forte **Précision** Faible → Forte **Spécialisation** Forte → Faible			

(2)(x nombre de VER^j)

3 - II.3.7 Modèle de composant du bloc de batterie (flux d'énergie thermique, niveau 1)

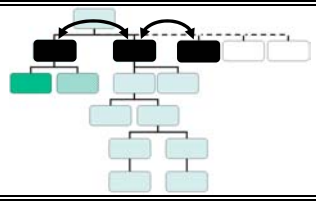
Nous avons pu écrire des modèles d'interaction et de composant à plusieurs niveaux systémiques. Nous en déduisons un modèle de composant pour le bloc de la batterie. Cela nécessite de faire une intégration qui est largement simplifiée par l'écriture des modèles et par les hypothèses faites. On en déduit le modèle de composant suivant au niveau 1 issu de la concaténation puis de la simplification des modèles (MC et MI) de niveau 3.

On peut déterminer la température de l'air en sortie de batterie et déduire la température maximale dans la batterie en faisant les hypothèses suivantes :

- écoulement unidimensionnel,
- Cp de l'air et k^j constants et moyens le long de l'écoulement (en fait, c'est h_{conv} qui est considéré comme constant).

Le modèle d'interaction du flux d'énergie thermique au niveau 1 est peu différent de celui donné par le tableau 3-10 (p. 79) qui reliait le MC de niveau 1 du bloc électrique de batterie au milieu extérieur « air froid poussiéreux ». Il est donné par le tableau 3-27.

Tableau 3-27 : Modèle d'interaction au niveau 1 pour le flux d'énergie thermique

Niveau 1		Flux d'ÉNERGIE THERMIQUE	
VCo	**VCr**	**VI**	**Modèle d'interaction**
		$T_{air,ext}$, $T_{air,ent}$	$T_{air,ent} = T_{air,ext}$
Parcimonie Faible → Forte **Exactitude** Faible → Forte **Précision** Faible → Forte **Spécialisation** Forte → Faible			

Flux D'ÉNERGIE THERMIQUE

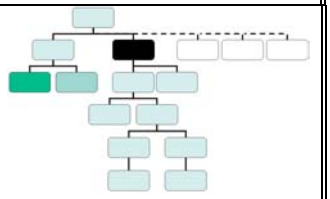
Le modèle obtenu pour le flux d'énergie thermique au niveau 1 est un modèle issu des modèles de composant et d'interaction des niveaux inférieurs. À l'aide des différentes adaptations faites – résultant, d'intégration analytique, d'hypothèses spécialisantes et simplificatrices – on a pu proposer un modèle de niveau 1 faisant intervenir les variables critères définies par le cahier des charges ainsi que les variables de conception structurantes du système. Il est alors nécessaire de qualifier le modèle obtenu vis-à-vis des objectifs de conception ; il faut estimer la généralisabilité ainsi que l'exactitude du modèle, perdues au détriment de la formalisation d'un modèle parcimonieux adapté à la conception du système. L'exactitude et la précision du modèle au niveau 1 seront directement conditionnées par l'exactitude et la précision des modèles aux niveaux inférieurs.

Le modèle de composant du bloc de la batterie pour le flux d'énergie thermique obtenu est écrit au niveau 1, il est donné par le tableau 3-28.

Tableau 3-28 : Modèle de composant du bloc électrique pour le flux d'énergie thermique (niveau 1)

Niveau 1	Bloc	Flux d'ÉNERGIE THERMIQUE

VCo	VCr	VI	Modèle de composant
$n_{élém,L}$ $n_{élém,l}$ $n_{élém,H}$ $H_{élém}$ e_{spac} n_{fais} l_{fais} L_{fais} n_{el+}, e_{el+} n_{el-}, e_{el-} e_{sep}, n_{sep} χ e_p matériaux	T_{bat}^{max} ΔT_{bat}^{max}	Π_t, $\lambda_{éq}$ $T_{air,sort}$ $T_{air,ent}$ $q_{air,espac}$ $A_{éch,tot}$ λ_{el+}, λ_{el-} λ_{sol}, λ_{sep} K, $\overline{h}$ h_{interf}, λ_p $\overline{\lambda}_{air}$, $\overline{\mu}_{air}$ $\overline{Cp}_{air}$, Nu Re, Pr	• Bilan enthalpique : $T_{bat}^{max} = \frac{\Pi_t \cdot L_{fais}^2}{8 \cdot \lambda_{éq}} + \frac{\Pi_t \cdot L_{fais}}{2 \cdot K} + T_{air,sort} - \frac{\Pi_t \cdot L_{fais} \cdot A_{éch}}{2 \cdot q_{air,espac} \cdot \overline{Cp}_{air}}$ • Homogénéisation : $\lambda_{éq} = \frac{n_{el+} \cdot \lambda_{el+} \cdot e_{el+} + n_{el-} \cdot \lambda_{el-} \cdot e_{el-} + n_{sep} \cdot \left(\lambda_{sol} \cdot \chi + \lambda_{sep} \cdot (1-\chi)\right) \cdot e_{sep}}{n_{el+} \cdot e_{el+} + n_{el-} \cdot e_{el-} + n_{sep} \cdot e_{sep}}$ • Condition aux limites : $\Delta T_{bat}^{max} = T_{air,sort} - T_{air,ent} - \frac{\Pi_t \cdot L_{fais} \cdot A_{éch}}{2 \cdot q_{air,espac} \cdot \overline{Cp}_{air}}$ • Bilan de conservation sur l'air : $T_{air,sort} - T_{air,ent} = \frac{\Pi_t \cdot L_{fais} \cdot A_{éch,tot}}{2 \cdot q_{air,espac} \cdot \overline{Cp}_{air}}$ • Bilan de conservation du débit : $q_{air,espac} = \frac{\rho_{air,ent} \cdot Q_{bat}}{(n_{élém,l} + 1) \cdot n_{élém,H}}$ • Géométrie : $A_{éch,tot} = 2 \cdot n_{élém,L} \cdot n_{fais} \cdot l_{fais} \cdot H_{élém}$, $A_{éch} = 2 \cdot l_{fais} \cdot H_{élém}$ • Coefficients d'échange : $K = \frac{1}{\frac{1}{\overline{h}} + \frac{1}{h_{interf}} + \frac{e_p}{\lambda_p}}$, $\overline{h} = \frac{\overline{\lambda}_{air} \cdot Nu}{2 \cdot e_{spac}}$, $Re = \frac{2 \cdot q_{air}}{\overline{\mu}_{air} \cdot H_{élém}}$, $Pr = \frac{\overline{\mu}_{air} \cdot \overline{Cp}_{air}}{\overline{\lambda}_{air}}$ • Corrélations : $Nu = f\left(Re, Pr, e_{spac}, l_{fais}\right)$

Parcimonie	*Faible*	*Forte*	
Exactitude	*Faible*	*Forte*	
Précision	*Faible*	*Forte*	
Spécialisation	*Forte*	*Faible*	

La figure 3-21 permet de visualiser les différents niveaux systémiques auxquels on a formalisé des MC et des MI pour le flux d'énergie thermique.

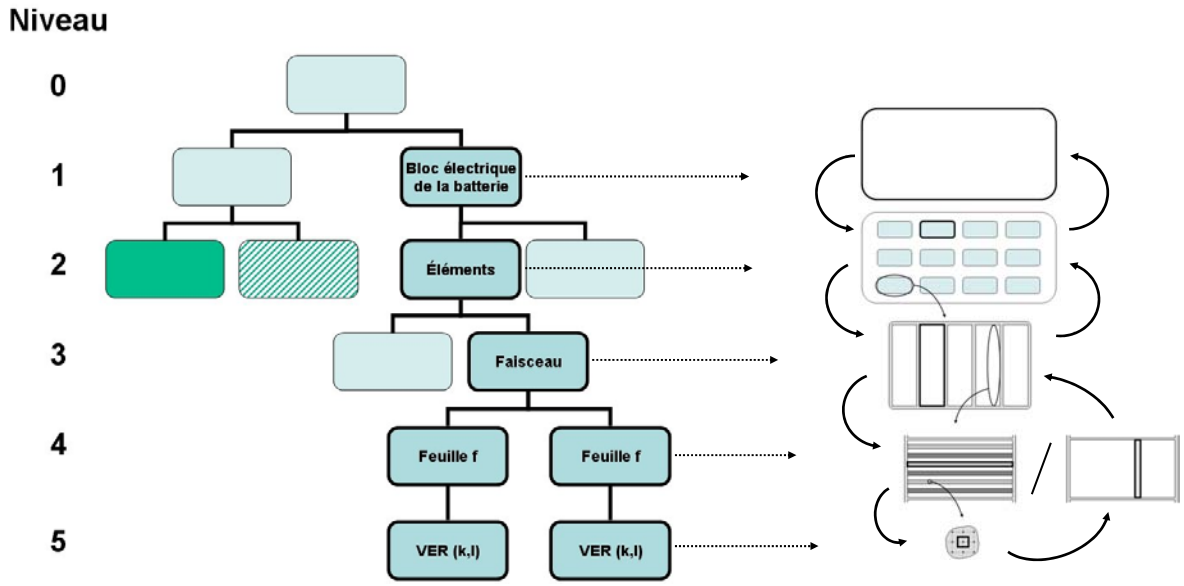


Figure 3-21 : Récapitulatif des niveaux systémiques rencontrés pour le flux d'énergie thermique

3 - II.4 Flux d'énergie mécanique (air) (FEMA)

3 - II.4.1 Niveau 1

On a déjà proposé au paragraphe 3 - II.2 un modèle de niveau 1 pour l'ensemble des flux fonctionnels considérés. Au paragraphe 3 - II.2.8, on a vu que les modèles de composants de niveau 1 limitaient les choix de conception aux configurations standard. Si l'on souhaite étendre l'espace de recherche des choix de conception, on peut proposer d'autres choix qu'un système de ventilation standard en descendant dans les niveaux systémiques. On trouve dans la figure 3-22 l'OTe du système de ventilation et dans la figure 3-23 le BDF du système de ventilation (niveau 2). On se propose d'écrire les modèles pour le flux d'énergie mécanique associé à la circulation d'air au niveau 2 pour le système de ventilation.

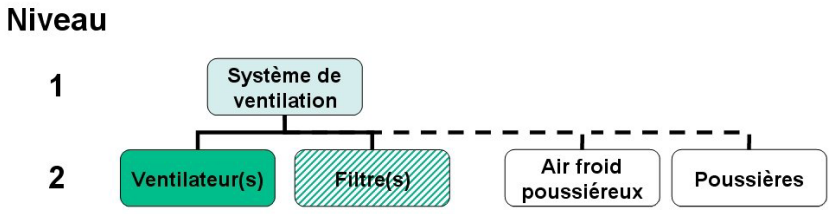


Figure 3-22 : Décomposition fonctionnelle au niveau 2 du système de ventilation

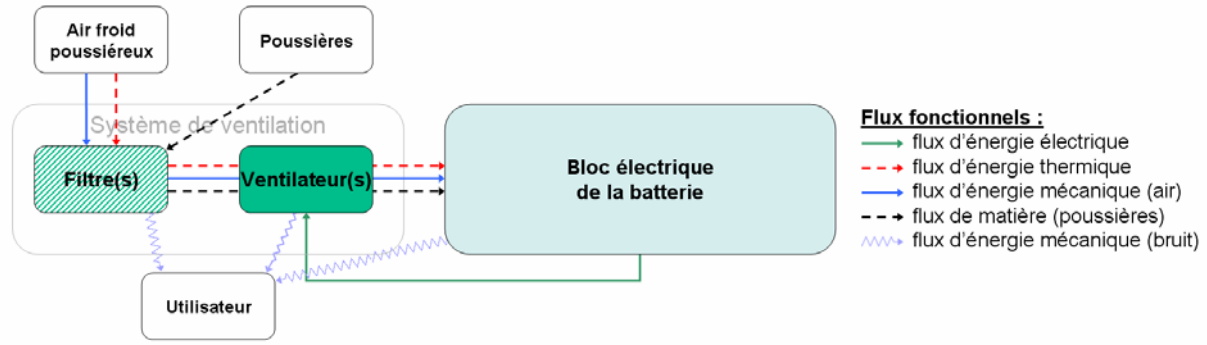


Figure 3-23 : Bloc diagramme fonctionnel du système de ventilation au niveau 2

3 - II.4.2 Système de ventilation (Niveau 2)

a. Modèles de composants

1. Ventilateur

La forme, la géométrie, des éléments choisis pour la batterie vont conditionner le choix du (des) ventilateur(s) : les pertes de charge induites par ces éléments vont devoir être compensées par le fonctionnement du ventilateur, les performances du ventilateur qui sont un critère de choix pour ce bloc fonctionnel sont conditionnées par l'influence des différents éléments traversés par le flux fonctionnel d'énergie mécanique (circulation d'air).

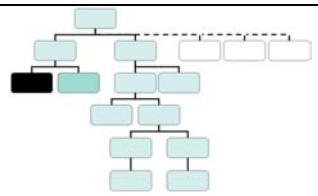
Variables d'aide à la décision pour le ventilateur :

Variables de conception : le ou les ventilateur(s) étant défini(s) comme composant standard, la variable de conception est la dénomination du ventilateur, donc une ou plusieurs références de catalogue.

Variables critères : les critères de choix d'un ventilateur sont généralement basés sur les performances du ventilateur mesurées par l'intermédiaire d'une courbe débit/pression donnée par le constructeur et d'un rendement qui intervient dans le modèle d'interaction pour le flux d'énergie électrique.

Le modèle de composant d'un ventilateur pour le flux d'énergie mécanique à ce niveau de représentation est la relation qui associe une variable décrivant le choix d'un ventilateur (à choisir parmi un ensemble discret) aux variables critères permettant d'évaluer ses performances mécaniques en rapport avec le circuit. Le modèle est synthétisé par le tableau 3-29, il ne concerne que le flux d'énergie mécanique de la circulation d'air.

Tableau 3-29 : Modèle de composant du ventilateur pour le flux d'énergie mécanique au niveau 2

Niveau 2	Ventilateur		Flux d'ÉNERGIE MÉCANIQUE (AIR)
VCo	**VCr**	**VI**	**Modèle de composant**
Référence(s) de ventilateur	Q_{ventil} *, ΔP_{ventil} * $Q_{ventil} \cdot \Delta P_{ventil}$ *	$P_{e,ventil}$ $P_{s,ventil}$	$Q_{ventil} = f(\Delta P_{ventil})$ * $\Delta P_{ventil} = \lvert P_{e,ventil} - P_{s,ventil} \rvert$
Parcimonie Faible → Forte **Exactitude** Faible → Forte **Précision** Faible → Forte **Spécialisation** Forte → Faible			

*** données catalogue constructeur**

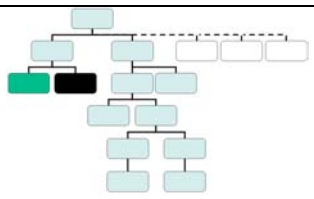
2. Filtre

Variables d'aide à la décision pour le filtre :

Variables de conception : le filtre est choisi comme un composant standard à dimensionner, sur catalogue ; les variables de conception sont la dénomination du filtre ainsi que ses dimensions, les dimensions (notamment la section) sont déterminées par l'intermédiaire du flux de matière (poussières).

Variables critères : pour le flux d'énergie mécanique, ce sont les pertes de charge qui contraignent le choix de conception du filtre, on cherche donc à évaluer la perte de charge due au(x) filtre(s).

Tableau 3-30 : Modèle de composant du filtre pour le flux d'énergie mécanique au niveau 2

Niveau 2	Filtre		Flux d'ÉNERGIE MÉCANIQUE (AIR)
VCo	**VCr**	**VI**	**Modèle de composant**
Référence(s) de filtre Section (S_{filtre})	$\Delta P_{finale,filtre}$ * V_{filtre} *	Q_{filtre} , $P_{e,filtre}$ $P_{s,filtre}$	$\Delta P_{finale,filtre} = \lvert P_{e,filtre} - P_{s,filtre} \rvert$ $S_{filtre} = \frac{Q_{filtre}}{V_{filtre}}$
Parcimonie Faible → Forte **Exactitude** Faible → Forte **Précision** Faible → Forte **Spécialisation** Forte → Faible			

*** données catalogue constructeur**

Les constructeurs fournissent généralement les pertes de charge provoquées par le filtre, quand il n'est pas encrassé (perte de charge initiale) ainsi que la perte de charge finale au-delà de laquelle le filtre doit être considéré comme colmaté, le ventilateur doit fonctionner quand le filtre est colmaté. Ces pertes de charge sont données pour une vitesse du fluide nominale lors de l'utilisation du filtre, ce qui impose des dimensions à la section de passage du filtre.

b. Modèle d'interaction

Comme nous l'avons montré au chapitre 2, nous utilisons la notion d'interface fonctionnelle pour formaliser le modèle d'interaction. Dans notre cas, l'interface fonctionnelle entre le bloc électrique et le système de ventilation, par exemple, est assurée par des éléments d'interface permettant de réaliser la fonction SC1-1 (*cf.* tableau 3-1). La conception fait intervenir des conduites permettant de transporter le flux d'air du système de ventilation, ces éléments d'interface nécessitent d'être modélisés et leurs modèles constituent un modèle d'interaction pour le flux fonctionnel qu'ils véhiculent.

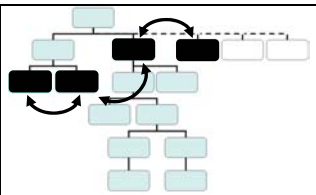
L'identification des différents blocs fonctionnels (incluant les milieux extérieurs) conduit également à mettre en évidence les interfaces fonctionnelles, à l'aide de la figure 3-23, on peut ainsi considérer des éléments d'interface :

- entre l'air extérieur et le filtre (interface 1),
- entre le filtre et le ventilateur (interface 2),
- entre le ventilateur et le bloc électrique (interface 3),
- et enfin, entre le bloc et l'extérieur (interface 4).

Chacune de ces interfaces assure la continuité du flux d'énergie mécanique entre les différents éléments de la batterie, ce sont des conduites droites, des conduites d'aspiration, d'évacuation, de changement de direction, des bifurcations, qui assurent la circulation du flux d'énergie mécanique d'air. Les modèles de composant de ces éléments d'interface constituent le modèle d'interaction pour ce flux. Le critère de conception de ces éléments est également déduit des pertes de charge. Cependant, si les pertes de charge dépendent des variables de conception de chacun de ces éléments, elles dépendent également de la configuration de l'écoulement. Il est donc nécessaire à ce stade de spécialiser le modèle d'interaction en définissant une ou plusieurs configurations du réseau de circulation d'air, qui dépendra de l'encombrement du système. Il est donc nécessaire de proposer plusieurs modèles pour les interfaces selon les cas et selon les objectifs de conception. Dans notre étude, nous ne formalisons qu'un modèle général. Il est également possible selon l'objectif d'exactitude associé au modèle de négliger les pertes de charge, l'élément d'interaction est considéré dans ce cas comme ne transformant pas le flux.

Les variables de conception des éléments d'interface sont le type et les dimensions des conduites. Elles influencent le flux d'énergie mécanique d'air en augmentant les pertes de charges dans le circuit. La variable critère d'une conduite pour ce flux est la perte de charge dans la conduite. Les coefficients de pertes de charges peuvent être trouvés dans des ouvrages de référence [Idel'cik, 1986].

Tableau 3-31 : Modèle de composant de l'interface i pour le flux d'énergie mécanique (niveau 2)

Niveau 2	Interface i		Flux d'ÉNERGIE MÉCANIQUE (AIR)
VCo	**VCr**	**VI**	**Modèle de composant**
Type, dimensions de la conduite * S_i	ΔP_i	Q_{ent} P^i_{ent} , P^i_{sort} ρ_{air} , ξ_i	$Q_i = Q^i_{ent}$, $Q_i = Q^i_{sort}$, $\Delta P_i = \left\lvert P^i_{ent} - P^i_{sort} \right\rvert$ $\Delta P_i = \xi_i \cdot \frac{\rho_{air} \cdot \left(\frac{Q_i}{S_i}\right)^2}{2}$ [Idel'cik, 1986]
Parcimonie Faible → Forte **Exactitude** Faible → Forte **Précision** Faible → Forte **Spécialisation** Forte → Faible			

*** données catalogue constructeur**

Si l'on considère les pertes de charges créées par les éléments de liaison, la spécialisation du modèle est due à la configuration d'écoulement, qui fixe les valeurs de la pression en entrée et en sortie d'un élément d'interface.

3 - II.4.3 Bloc électrique de la batterie (Niveau 2)

À ce stade, il est a priori nécessaire de connaître la géométrie interne du bloc afin de déterminer les pertes de charge, qui sont à déterminer pour évaluer l'influence du bloc sur le flux d'énergie mécanique. Il n'est pas possible de définir un modèle à ce niveau de représentation à moins d'utiliser un bloc standard. Nous considérons donc le bloc électrique au niveau 2 (*cf.* figure 3-24).

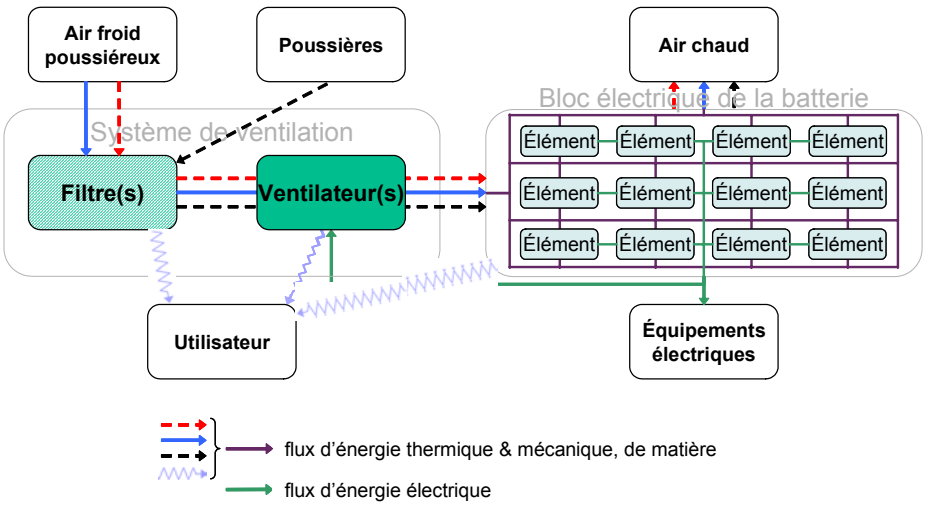
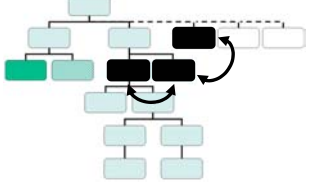


Figure 3-24 : Bloc diagramme fonctionnel de niveau 2

Tableau 3-32 : Modèle d'interaction pour le flux d'énergie mécanique au niveau 2

Niveau 2	Flux d'ÉNERGIE MÉCANIQUE (AIR)		
VCo	**VCr**	**VI**	**Modèle d'interaction**
• Dimensions d'un élément ($L_{élém}$, $H_{élém}$, $l_{élém}$) • Nombre d'éléments ($n_{élém,l}$, $n_{élém,L}$, $n_{élém,H}$) • Espacement entre alignements (e_{spac}) • Rugosité faces latérales alignements (asp) Dimensions du bloc (H_{bloc}, l_{bloc}, L_{bloc}) L_{fais} e_p	ΔP_{bat}	$q_{bat,air}$ σ_e σ_s $\rho_{air,ent}$ $\rho_{air,sort}$ $\overline{\rho_{air}}$ K_e K_s A S f $P_{e,bat}$ $P_{s,bat}$ S_{ent} S_{bloc} S_{sort} Q_{bat} $T_{air,sort}$ $T_{air,ent}$ Re $\overline{\mu_{air}}$	• Pertes de charge : $\Delta P_{bat} = \frac{1}{2}\left(\frac{q_{bat,air}}{S}\right)^2\left[\frac{1-\sigma_e^2+K_e}{\rho_{air,ent}}+2\left(\frac{1}{\rho_{air,sort}}-\frac{1}{\rho_{air,ent}}\right)+f\frac{A}{S}\frac{1}{\overline{\rho_{air}}}+\frac{\sigma_s^2-1+K_s}{\rho_{air,sort}}\right]$ • Condition aux limites : $\Delta P_{bat} = \lvert P_{e,bat} - P_{s,bat} \rvert$ • Géométrie : $\sigma_e = \frac{S_{ent}}{S_{bloc}}$, $\sigma_s = \frac{S_{sort}}{S_{bloc}}$, $S_{bloc} = H_{bloc} \cdot l_{bloc}$ $A = 2 \cdot n_{élém,L} \cdot H_{élém} \cdot L_{élém}$, $S = e_{spac} \cdot H_{élém}$ $l_{élém} = L_{fais} + 2 \cdot e_p$ $H_{bloc} = n_{élém,H} \cdot H_{élém}$, $L_{bloc} = n_{élém,L} \cdot L_{élém}$, $l_{bloc} = n_{élém,l} \cdot \left(l_{élém} + e_{spac}\right)$ • Conservation du débit : $q_{bat,air} = \frac{\rho_{air,ent} \cdot Q_{bat}}{\left(n_{élém,l}+1\right) \cdot n_{élém,H}}$ • $\rho_{air,sort} = \frac{1{,}2045 \times 293}{T_{air,sort}}$, $\rho_{air,ent} = \frac{1{,}2045 \times 293}{T_{air,ent}}$, $\overline{\rho_{air}} = \frac{\rho_{air,ent}+\rho_{air,sort}}{2}$ • $Re = \frac{2 \cdot q_{bat,air}}{\overline{\mu_{air}} \cdot H_{élém}}$ • Corrélations [Idel'cik, 1986] [Dal Zotto et al., 1989] : • $Re < 2000 \Rightarrow f = \frac{16}{Re}$ • $Re > 2000 \Rightarrow f = \frac{0{,}25}{\left[a_1 + b_1 \cdot log\left(Re \cdot \sqrt{4f}\right) + c_1 \cdot log\left(\overline{\Delta}\right)\right]^2}$ - $3{,}6 \le \overline{\Delta} \cdot Re \cdot \sqrt{4f} < 10 \Rightarrow a_1 = -0{,}800 \quad b_1 = 2{,}000 \quad c_1 = 0$ avec $\overline{\Delta} = \frac{asp}{2 \cdot e_{spac}}$ - $10 \le \overline{\Delta} \cdot Re \cdot \sqrt{4f} < 20 \Rightarrow a_1 = 0{,}068 \quad b_1 = 1{,}130 \quad c_1 = -0{,}870$ - $20 \le \overline{\Delta} \cdot Re \cdot \sqrt{4f} < 40 \Rightarrow a_1 = 1{,}538 \quad b_1 = 0{,}000 \quad c_1 = -2{,}000$ - $40 \le \overline{\Delta} \cdot Re \cdot \sqrt{4f} < 191{,}2 \Rightarrow a_1 = 2{,}471 \quad b_1 = -0{,}588 \quad c_1 = -2{,}588$ - $\overline{\Delta} \cdot Re \cdot \sqrt{4f} \ge 191{,}2 \Rightarrow a_1 = 1{,}138 \quad b_1 = 0 \quad c_1 = -2{,}000$ • Coefficients de pertes de charge singulières [Idel'cik, 1986] : $K_e = 1{,}03$ $K_s = 0{,}5$	

Parcimonie	*Faible*	*Forte*	
Exactitude	*Faible*	*Forte*	
Précision	*Faible*	*Forte*	
Spécialisation	*Forte*	*Faible*	

On ne fait pas intervenir les éléments, seule la géométrie et la disposition des éléments entre eux et par rapport à l'enceinte sont nécessaires. On n'a donc pas de modèle de composant à formaliser pour le niveau 2. En revanche, le modèle d'interaction de niveau 2 est structurant et le modèle de composant du bloc électrique (niveau 1) n'est constitué que de ce modèle d'interaction.

Afin de déterminer les pertes de charge dans le bloc, il faut préciser la géométrie des écoulements au sein du bloc et nous avons une nouvelle fois spécialisé notre modèle pour limiter son domaine d'application au concept de solution pour le bloc électrique de la batterie à un écoulement d'air unique et unidimensionnel dans le bloc (en cohérence évidemment avec les hypothèses faites pour le FET). L'air circule entre des alignements de modules. Le modèle de composant du bloc pour le flux d'énergie mécanique est présenté dans le tableau 3-32.

3 - II.5 Flux d'énergie mécanique, due au bruit (FEMB)

Le flux d'énergie mécanique due au bruit est un effet induit par l'écoulement de l'air dans les différents éléments du système. Le niveau de bruit d'un élément est complètement lié à la différence de pression et au débit d'air au sein de l'élément. Pour chaque élément modifiant le flux d'énergie mécanique due au bruit, on peut écrire un modèle de composant au même niveau que le flux d'énergie mécanique liée à la circulation d'air (*cf.* figure 3-23). On peut donc considérer ou non les éléments d'interface.

3 - II.5.1 Modèles de composant

a. Système de ventilation

Pour les éléments du système de ventilation, les modèles de composant déterminant les pertes de charge ont été formalisés au niveau 2. Le niveau de bruit du ventilateur est généralement donné par les constructeurs, car il comprend le bruit dû aux éléments mécaniques en mouvement, au moteur, etc. Les modèles de composant pour le FEMB [AICVF, 1997] sont donnés dans les tableaux suivants.

Tableau 3-33 : Modèle de composant du filtre pour le flux d'énergie mécanique due au bruit (niveau 2)

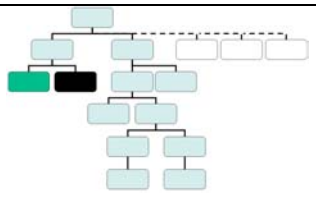
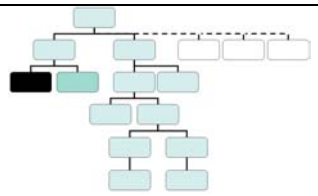
Niveau 2	Filtre		Flux d'ÉNERGIE MÉCANIQUE (BRUIT)
VCo	**VCr**	**VI**	**Modèle de composant**
Référence(s) de filtre	N^{dB}_{filtre}	Q_{filtre} $\Delta P_{finale,filtre}$	$N^{dB}_{filtre} = 10 \cdot log\left(b \cdot Q_{filtre} \cdot \Delta P_{finale,filtre}{}^{2}\right)$ (b=cste)
Parcimonie Faible → Forte **Exactitude** Faible → Forte **Précision** Faible → Forte **Spécialisation** Forte → Faible			

Tableau 3-34 : Modèle de composant du ventilateur pour le flux FEMB (niveau 2)

Niveau 2	Ventilateur		Flux d'ÉNERGIE MÉCANIQUE (BRUIT)
VCo	**VCr**	**VI**	**Modèle de composant**
Référence(s) de ventilateur	N_{ventil}^{dB} *		N_{ventil}^{dB}
Parcimonie Faible → Forte			
Exactitude Faible → Forte			
Précision Faible → Forte			
Spécialisation Forte → Faible			



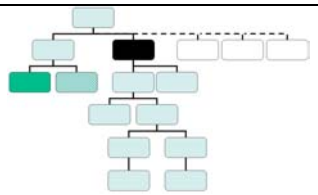
*** données catalogue constructeur**

b. Bloc électrique de la batterie

Les pertes de charge dans le bloc de la batterie sont déterminées à l'aide du modèle d'interaction de niveau 2 qui constitue le modèle de composant du bloc de la batterie pour le flux FEMA au niveau 1. Le bruit créé par l'écoulement de l'air dans la batterie est déterminé par l'intermédiaire de ce modèle.

Tableau 3-35 : Modèle de composant du bloc de batterie pour le flux d'énergie mécanique due au bruit

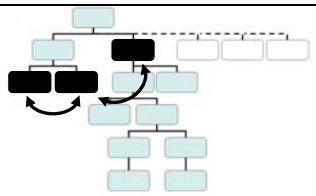
Niveau 1	Bloc		Flux d'ÉNERGIE MÉCANIQUE (BRUIT)
VCo	**VCr**	**VI**	**Modèle de composant**
	N_{bat}^{dB}	Q_{bat} , ΔP_{bat}	$N_{bat}^{dB} = 10 \cdot log\left(b \cdot Q_{bat} \cdot \Delta P_{bat}^{\ 2}\right)$ (b=cste)
Parcimonie Faible → Forte			
Exactitude Faible → Forte			
Précision Faible → Forte			
Spécialisation Forte → Faible			



3 - II.5.2 Modèle d'interaction

Il n'y a pas d'interaction à proprement parler entre les 3 éléments considérés précédemment, l'influence d'un élément sur l'autre pour le flux FEMB se fait au travers du flux d'énergie mécanique de circulation d'air. Le modèle d'interaction du flux FEMB consiste uniquement à considérer le bruit total émis par le système. Ce modèle permet de déduire du niveau de bruit de plusieurs sources sonores, le niveau total émis (tableau 3-36).

Tableau 3-36 : Modèle d'interaction pour le flux d'énergie mécanique due au bruit

<table>
<tr><th colspan="2">Niveau 0</th><th colspan="2">Flux d'ÉNERGIE MÉCANIQUE (BRUIT)</th></tr>
<tr><th>VCo</th><th>VCr</th><th>VI</th><th>Modèle d'interaction</th></tr>
<tr><td></td><td>N^{dB}</td><td>N^{dB}_{filtre} , N^{dB}_{ventil} , N^{dB}_{bat}</td><td>$N^{dB} = 10 \cdot log\left(10^{\frac{N^{dB}_{filtre}}{10}} + 10^{\frac{N^{dB}_{ventil}}{10}} + 10^{\frac{N^{dB}_{bat}}{10}}\right)$</td></tr>
<tr><td colspan="3">Parcimonie Faible → Forte
Exactitude Faible → Forte
Précision Faible → Forte
Spécialisation Forte → Faible</td><td></td></tr>
</table>

On peut également selon l'exactitude nécessaire à l'exploitation du modèle, considérer les sources de bruit dues aux pertes de charge dans les éléments d'interface. Les éléments d'interaction modifient le flux d'énergie mécanique due au bruit de deux manières : la première consiste à propager (tout en l'atténuant) le bruit émis par le ventilateur et à le conduire vers l'extérieur jusqu'à la bouche d'air, la seconde consiste en une régénération de puissance acoustique due aux turbulences de l'air dans les éléments. D'une manière générale, la régénération reste négligeable devant le niveau de puissance acoustique du ventilateur. Enfin, la transmission du bruit vers l'extérieur concerne une autre fonction contrainte du cahier des charges qu'on pourrait être amenée à examiner, mais que nous n'avons pas considérée qui serait : « Limiter les nuisances sonores vers l'extérieur ».

3 - II.6 Flux de matière (poussières) (FM)

3 - II.6.1 Modèle empirique de déposition de particules

Le flux de matière (masse de poussières) est complètement lié au flux d'énergie mécanique (circulation d'air) puisque les particules en suspension dans l'air sont transportées par l'écoulement fluide de l'air. Le dépôt de ces particules sur les surfaces des éléments traversés par l'air est inévitable ; l'accumulation progressive de ces particules encrasse le système [Einberg et Holmberg, 2003]. [Sippola et Nazaroff, 2002] font une revue des recherches pour modéliser la déposition des particules dans les conduites de ventilation. On utilise pour formaliser le modèle d'interaction associé au flux de matière, un modèle issu de corrélations expérimentales obtenues à l'aide de l'analyse dimensionnelle [Papavergos et Hedley, 1984].

Pour un écoulement turbulent en régime établi isotherme, le flux massique de dépôt des particules s'écrit pour un volume de contrôle considéré : $\varphi_{m_p} = V_p \cdot \mathbf{c^p}$, avec V_p vitesse de dépôt de particules p, $\mathbf{c^p}$ concentration en particules p en entrée du volume de contrôle en g/m^3 d'air. La masse de particules déposées est $\Delta m_p = \varphi_{m_p} \cdot A_f$.

La vitesse de dépôt d'une classe de particule p est donnée par les corrélations empiriques déterminées par [Papavergos et Hedley, 1984], on les exprime de la manière suivante [GREThi, 1989] :

$V_p = U^* \cdot V_p^+$ avec $U^* = \sqrt{\frac{\tau_f}{\rho_{air}}} = \sqrt{\frac{S \cdot \Delta P}{\rho_{air} \cdot A_f}}$ vitesse de frottement

$t_p^+ = \frac{1}{18}\frac{S}{A_f}\frac{\rho_p \cdot d_p^2 \cdot \Delta P}{\mu_{air}^2}$ est le temps adimensionnel de relaxation, il caractérise le régime de déposition en fonction de l'écoulement . V_p^+ est donnée, selon le régime de déposition, par les relations suivantes :

- $t_p^+ < 0{,}2 \quad \Rightarrow \quad V_p^+ = 0{,}065 \cdot (S_c)^{-\frac{2}{3}}$

  $S_c = \frac{\nu_{air}}{D_B} \qquad D_B = \frac{k_B \cdot T_{air}}{3\pi \cdot \mu_{air} \cdot d_p}$ (k_B constante de Boltzmann = $1{,}38.10^{-23}$ $J.K^{-1}$)

- $0{,}2 < t_p^+ < 20 \quad \Rightarrow \quad V_p^+ = 3{,}5.10^{-4} \cdot (t_p^+)^2$

- $20 < t_p^+ \quad \Rightarrow \quad V_p^+ = 0{,}18$

Chaque classe de particule p est caractérisée par une concentration dans l'air, un diamètre équivalent et une densité volumique de particule pour la classe considérée, et l'air ambiant à un endroit précis est caractérisé par la répartition granulométrique. La répartition granulométrique indique pour chaque classe de particules p la concentration dans l'air en particules p à un endroit donné. Il est donc nécessaire de faire le calcul de Δm_p pour chaque classe de particule.

La masse totale déposée sur la surface d'un volume de contrôle donné est donc donnée par la relation : $\Delta m_{tot} = \sum_p \Delta m_p$.

Ce critère n'est pas exploitable directement en conception. En revanche, la masse de poussière déposée est une contrainte dont on cherche à s'affranchir, car elle modifie les transferts thermiques, en effet la conduction à travers la couche de poussières déposées peut limiter les transferts thermiques. Ainsi, un critère a été défini pour le cahier des charges, ce critère est couplé au flux d'énergie thermique par l'intermédiaire de l'épaisseur de poussières déposées. Cette épaisseur limite les transferts thermiques entre l'air et les faisceaux. La variable critère que nous définissons pour le flux de matière pour le bloc fonctionnel bloc électrique est une hausse de la température maximale dans le bloc de 10% en fin de vie du filtre, c'est-à-dire quand le filtre est colmaté. D_{filtre}, la durée de vie du filtre, est la variable critère du filtre. Le calcul de la masse de poussières déposées nécessite de connaître les pertes de charge dans le volume de contrôle, nous allons donc écrire les modèles de composants associés au flux de matière aux mêmes niveaux que les niveaux auxquels les pertes de charge ont été déterminées dans le système.

3 - II.6.2 Analyse

De la même manière qu'au paragraphe précédent, le flux de matière des poussières est donc couplé au flux d'énergie mécanique de circulation de l'air. Les éléments qui transforment ce flux fonctionnel sont donc les éléments pour lesquels on a considéré un modèle de composant pour le flux d'énergie mécanique de circulation d'air. On va donc, dans un premier temps, formaliser les modèles de composant pour le flux de matière au même niveau que les modèles de composant associés au flux FEMA, c'est-à-dire pour le filtre, le ventilateur, le bloc électrique de la batterie et les éléments d'interface.

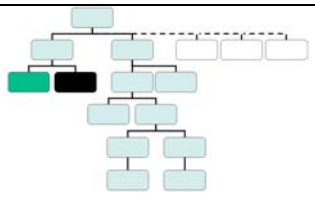
3 - II.6.3 Modèles de composant

a. Filtre

Le filtre doit être choisi de sorte à limiter la maintenance de la batterie (fonction MC1, *cf.* § 3 - II.1). La variable critère choisie est la durée de vie du filtre D_{filtre} pour une utilisation normale dans une ambiance de poussières définie par le modèle du milieu extérieur.

Les variables de conception du filtre associées au flux de matière sont, en plus de la référence constructeur du filtre, son efficacité gravimétrique (définie par le rapport, en pourcentage, de la différence des concentrations massiques amont et aval à la concentration amont), ainsi que sa capacité d'absorption avant colmatage (masse de poussières retenues maximale par unité de surface). Le modèle de composant du filtre pour le flux de matière est donné dans le tableau 3-37.

Tableau 3-37 : Modèle de composant du filtre pour le flux de matière (niveau 2)

Niveau 2	**Filtre**		**Flux de MATIÈRE**
VCo	**VCr**	**VI**	**Modèle de composant**
Référence de filtre Efficacité (ε_{filtre} *) Capacité avant colmatage (κ_{filtre} *) S_{filtre}	D_{filtre}	Q_{filtre} $\mathbf{c}_0$ $\mathbf{c}^{\mathbf{p}}_{air}$ (1)	• Durée de fonctionnement avant colmatage : $D_{filtre} = \frac{\kappa_{filtre} \cdot S_{filtre}}{Q_{filtre} \cdot \mathbf{c}_0 \cdot \varepsilon_{filtre}}$ • Bilan de conservation de la masse : $\forall p \quad \mathbf{c}^{\mathbf{p}}_{filtre,s} = \left(1 - \varepsilon_{filtre}\right) \cdot \mathbf{c}^{\mathbf{p}}_{air}$ (1)
Parcimonie Faible → Forte **Exactitude** Faible → Forte **Précision** Faible → Forte **Spécialisation** Forte → Faible			

(1) (x nombre de classes de particules p)
*** données catalogue constructeur**

b. Bloc électrique de la batterie

Nous avons défini une variable critère permettant de mesurer l'influence du flux de matière sur le fonctionnement du bloc de la batterie par l'intermédiaire du couplage avec le flux d'énergie thermique.

Les variables de conception qui interviennent directement dans l'écriture du modèle de composant du bloc pour le flux de matière sont les mêmes que les variables de conception nécessaires à la détermination de la température maximale dans le bloc. Le modèle de composant du bloc de la batterie pour le flux de matière est exposé dans le tableau 3-38 (*cf.* page suivante).

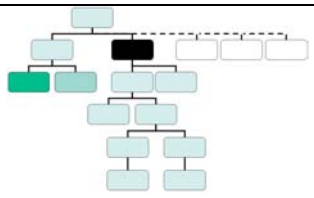
c. Ventilateur

Nous ne connaissons pas de modèle permettant de déterminer la quantité de poussières se déposant sur les éléments d'un ventilateur dans la mesure où les écoulements et les géométries sont complexes. Il peut être envisagé deux choses : soit le phénomène de déposition dans le ventilateur est négligé et il faut quantifier la perte d'exactitude sur la variable critère associée à ce flux afin d'estimer le risque de conception, soit il faut estimer grossièrement la masse de poussières déposées et la précision de cette estimation se répercutera sur la précision de la variable critère.

3 - II.6.4 Modèle d'interaction du flux de matière

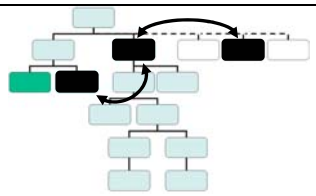
Le modèle d'interaction du flux de matière consiste à faire le bilan de conservation de la masse des particules en suspension dans l'air, en tenant compte du phénomène de déposition et d'encrassement des éléments de la batterie. Cela nécessite donc de déterminer la concentration en particules de chaque classe p, en amont et en aval de chaque élément considéré. Les seuls éléments dans lesquels peuvent se déposer des poussières sont les éléments de liaison (conduites, changements de section, etc.). Le modèle d'interaction est donné soit par les modèles de composant des éléments d'interface si on ne néglige pas les pertes de charge et leur influence sur le flux de matière (*cf.* tableau 3-39), soit, plus simplement, par le modèle d'interaction donné par le tableau 3-40 à la double-page suivante, si l'on néglige les pertes de charge.

Tableau 3-38 : Modèle de composant du bloc de la batterie pour le flux de matière (niveau 1)

Niveau 1	Bloc	Flux de MATIÈRE	
VCo	**VCr**	**VI**	**Modèle de composant**
L_{al} e_{spac} L_{fais}	ΔT_{enc}	Π_t, $\lambda_{éq}$ $T_{air,sort}$ $T_{bat,enc}^{\max}$, $T_{bat}^{\max}$ K_{enc}, K e_{pous} λ_{air} D_{filtre} ΔP_{bat} $\rho_{air,ent}$ $\overline{T_{air}}$, $\overline{\mu_{air}}$ U^* S_c, D_B V_p^+ (1), t_p^+ (1) $\mathbf{c}_{bat,ent}^{\mathbf{p}}$ (1) $\overline{\rho_p}$ (1), $\overline{d_p}$ (1)	• Bilan de conservation de la masse : $e_{pous} = \frac{\sum_p \varphi_{m_p}}{\overline{\rho_p}} \cdot D_{filtre} = \frac{\sum_p \left(U^* \cdot V_p^+ \cdot \mathbf{c}_{bat,ent}^{\mathbf{p}}\right)}{\overline{\rho_p}} \cdot D_{filtre}$ • Bilan enthalpique : $T_{bat,enc}^{max} = \frac{\Pi_t \cdot L_{fais}^2}{8 \cdot \lambda_{éq}} + \frac{\Pi_t \cdot L_{fais}}{2 \cdot K_{enc}} + T_{air,sort}$ $\Delta T_{enc} = T_{bat,enc}^{\max} - T_{bat}^{\max}$ • Coefficients d'échange : $K_{enc} = \frac{1}{\frac{1}{K} + \frac{e_{pous}}{\lambda_{air}}}$ • Vitesse de frottement : $U^* = \sqrt{\frac{e_{spac} \cdot \Delta P_{bat}}{2 \cdot L_{al} \cdot \rho_{air,ent}}}$ • Temps de relaxation adimensionnel : $t_p^+ = \frac{1}{18} \frac{e_{spac}}{2 \cdot L_{al}} \frac{\overline{\rho_p} \cdot \overline{d_p}^2 \cdot \Delta P_{bat}}{\overline{\mu_{air}}^2}$ • Corrélations [GREThi, 1989] : • $t_p^+ < 0{,}2 \quad \Rightarrow \quad V_p^+ = 0{,}065 \cdot (S_c)^{-\frac{2}{3}}$ $S_c = \frac{\nu_{air}}{D_B} \quad D_B = \frac{k_B \cdot \overline{T_{air}}}{3\pi \cdot \overline{\mu_{air}} \cdot \overline{d_p}}$ (k_B= 1,38.10^{-23} J.K^{-1}) • $0{,}2 < t_p^+ < 20 \quad \Rightarrow \quad V_p^+ = 3{,}5.10^{-4} \cdot (t_p^+)^2$ • $20 < t_p^+ \quad \Rightarrow \quad V_p^+ = 0{,}18$	
Parcimonie Faible → Forte **Exactitude** Faible → Forte **Précision** Faible → Forte **Spécialisation** Forte → Faible			

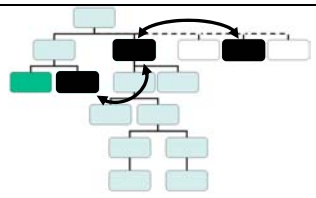
(1) (x nombre de classes de particules p)

Tableau 3-39 : Modèle de composant des éléments d'interface pour le flux de matière (niveau 2)

Niveau 2		Interface i	Flux de MATIÈRE
VCo	**VCr**	**VI**	**Modèle de composant**
S^i A_f^i	$\mathbf{c}_{i,s}^{\mathbf{p}}$	$\mathbf{c}_{air}^{\mathbf{p}}$ (1), ΔP_i $\rho_{air,ent}$, T_{air} μ_{air} , ν_{air} S_c , D_B V_p^+ (1), $t_p{}^+$ (1) $\mathbf{c}_{i,e}^{\mathbf{p}}$ (1) $\overline{\rho_p}$ (1), $\overline{d_p}$ (1)	• Bilan de conservation de la masse : $\forall p \quad \mathbf{c}_{i,s}^{\mathbf{p}} = \mathbf{c}_{i,e}^{\mathbf{p}} - \frac{\sqrt{\frac{S^i \cdot \Delta P^i}{\rho_{air,ent} \cdot A_f^i}} \cdot V_p^+ \cdot \mathbf{c}_{i,e}^{\mathbf{p}} \cdot A_f^i \cdot \rho_{air,ent}}{q_{air}}$ (1) • Temps de relaxation adimensionnel : $t_p{}^+ = \frac{1}{18} \frac{S^i}{A_f^i} \frac{\overline{\rho_p} \cdot \overline{d_p}^2 \cdot \Delta P_i}{\mu_{air}^2}$ (1) • Corrélations [GREThi, 1989] : • $t_p{}^+ < 0{,}2 \Rightarrow V_p^+ = 0{,}065 \cdot (S_c)^{-\frac{2}{3}}$ $S_c = \frac{\nu_{air}}{D_B}$ $D_B = \frac{k_B \cdot T_{air}}{3\pi \cdot \mu_{air} \cdot \overline{d_p}}$ (k_B= 1,38.10^{-23} J.K^{-1}) • $0{,}2 < t_p{}^+ < 20 \Rightarrow V_p^+ = 3{,}5.10^{-4} \cdot (t_p^+)^2$ • $20 < t_p{}^+ \Rightarrow V_p^+ = 0{,}18$
Parcimonie Faible → Forte **Exactitude** Faible → Forte **Précision** Faible → Forte **Spécialisation** Forte → Faible			

(1) (x nombre de classes de particules p)

Tableau 3-40 : Modèle d'interaction pour le flux de matière (niveau 2)

Niveau 2		Flux de MATIÈRE	
VCo	**VCr**	**VI**	**Modèle d'interaction**
		$\mathbf{c}_{filtre,s}^{\mathbf{p}}$ (1), $\mathbf{c}_{bat,ent}^{\mathbf{p}}$ (1)	• Bilan de conservation de la masse : $\mathbf{c}_{bat,ent}^{\mathbf{p}} = \mathbf{c}_{filtre,s}^{\mathbf{p}}$ (1)
Parcimonie Faible → Forte **Exactitude** Faible → Forte **Précision** Faible → Forte **Spécialisation** Forte → Faible			

(1) (x nombre de classes de particules p)

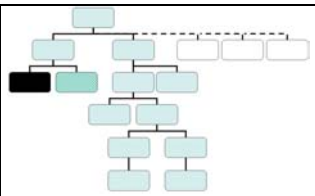
3 - II.7 Flux d'énergie électrique (FEE)

La figure 3-24 (page 106) donne le bloc diagramme fonctionnel du système de ventilation et du bloc électrique de la batterie au niveau 2. Pour le système de ventilation, seul le ventilateur transforme le flux d'énergie électrique, le bloc électrique de la batterie modifie également ce flux. On a déjà donné au paragraphe 3 - II.2.5a un modèle de composant pour un bloc électrique standard et au paragraphe 3 - II.2.7b un modèle d'interaction du flux d'énergie électrique au niveau 1.

3 - II.7.1 Ventilateur

Le ventilateur étant un élément standard, le modèle de composant pour le flux d'énergie électrique est connu, il est donné par le tableau 3-41.

Tableau 3-41 : Modèle de composant du ventilateur pour le flux d'énergie électrique (niveau 2)

Niveau 2	Ventilateur	Flux d'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE	
VCo	**VCr**	**VI**	**Modèle de composant**
Référence(s) de ventilateur	η_{ventil} *, $\wp_{ventil}$	Q_{ventil} *, ΔP_{ventil} *	$\wp_{ventil} = \frac{Q_{ventil} \cdot \Delta P_{ventil}}{\eta_{ventil}(Q_{ventil})}$
Parcimonie Faible → Forte **E**xactitude Faible → Forte **P**récision Faible → Forte **S**pécialisation Forte → Faible			

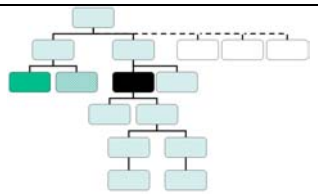
*** données catalogue constructeur**

3 - II.7.2 Bloc électrique

Sauf à considérer un bloc électrique de batterie standard, on ne peut proposer de modèle de composant du bloc électrique. Pour rester cohérent avec les hypothèses faites pour les autres flux, nous ne considérons pas un bloc standard. On se place donc au niveau systémique inférieur pour formaliser un modèle adapté (tableau 3-42).

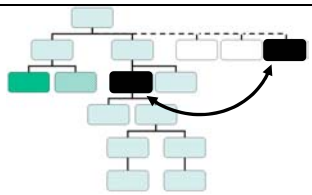
a. Niveau 2

Tableau 3-42 : Modèle de composant d'un élément pour le flux d'énergie électrique (niveau 2)

Niveau 2	Élément		Flux d'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE
VCo	**VCr**	**VI**	**Modèle de composant**
	$U_{élém}$, $C^0_{élém}$		pas de modèle connu à ce niveau pour évaluer les VCr
Parcimonie Faible → Forte **Exactitude** Faible → Forte **Précision** Faible → Forte **Spécialisation** Forte → Faible ?			

Le modèle d'interaction (*cf.* tableau 3-43) consiste à faire un bilan de conservation du flux d'énergie électrique, ce qui revient à écrire la loi des mailles et la loi des nœuds. Il tient compte de la disposition des éléments, qui sont connectés en série (on spécialise donc le modèle). On peut remarquer qu'à l'interface des éléments du bloc de batterie se trouvent des éléments de connection électrique, dont on néglige l'influence sur le flux d'énergie électrique.

Tableau 3-43 : Modèle d'interaction pour le flux d'énergie électrique (niveau 2)

Niveau 2	Flux d'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE		
VCo	**VCr**	**VI**	**Modèle d'interaction**
$n_{élém,l}$, $n_{élém,L}$, $n_{élém,H}$	U_{bloc} C^0_{bloc}	$U_{élém}$ $C^0_{élém}$	• Loi des mailles : $U_{bloc} = n_{élém,l} \cdot n_{élém,L} \cdot n_{élém,H} \cdot U_{élém}$ • Loi des nœuds : $C^0_{bloc} = C^0_{élém}$
Parcimonie Faible → Forte **Exactitude** Faible → Forte **Précision** Faible → Forte **Spécialisation** Forte → Faible			

Nous ne pouvons pas formaliser de modèle permettant de déterminer les variables critères des éléments en fonction des variables de conception, à moins d'utiliser des éléments du bloc de batterie qui soient standard. On peut tout de même remarquer que la concaténation du modèle d'interaction et du modèle de composant de niveau 2 constituerait un modèle de composant pour le bloc électrique si l'on pouvait formaliser le modèle d'un élément (*cf.* tableau 3-42). Pour rester cohérent avec les choix faits précédemment de ne pas utiliser des éléments de batterie standard, il est nécessaire de descendre à un niveau systémique où il est possible d'écrire un tel modèle. Nous nous plaçons au niveau 3.

b. Niveau 3

Le tableau 3-44 et le tableau 3-45 donnent le modèle de composant du faisceau et le modèle d'interaction pour le FEE au niveau 3.

Tableau 3-44 : Modèle de composant du faisceau pour le flux d'énergie électrique (niveau 3)

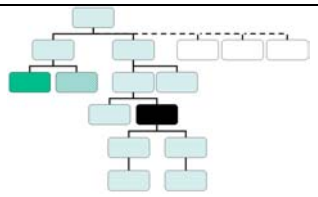
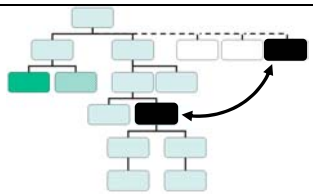
Niveau 3	Faisceau		Flux d'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE
VCo	**VCr**	**VI**	**Modèle de composant**
	U_{fais} , C^0_{fais}		pas de modèle connu à ce niveau pour évaluer les VCr
Parcimonie Faible → Forte **Exactitude** Faible → Forte **Précision** Faible → Forte **Spécialisation** Forte → Faible ?			

Tableau 3-45 : Modèle d'interaction pour le flux d'énergie électrique (niveau 3)

Niveau 3	Flux d'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE		
VCo	**VCr**	**VI**	**Modèle d'interaction**
n_{fais}	$U_{élém}$ $C^0_{élém}$	U_{fais} C^0_{fais}	• Loi des mailles : $U_{élém} = n_{fais} \cdot U_{fais}$ • Loi des nœuds : $C^0_{élém} = C^0_{fais}$
Parcimonie Faible → Forte **Exactitude** Faible → Forte **Précision** Faible → Forte **Spécialisation** Forte → Faible			

On peut faire les mêmes remarques que précédemment, à savoir, on ne peut utiliser les modèles de niveau 3, car on ne sait pas déterminer de variables critères définies par le cahier des charges. En revanche, si tel était le cas, la concaténation des modèles de composant et d'interaction constituerait le modèle de composant d'un élément de batterie.

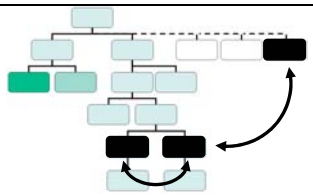
c. Niveau 4

Le comportement physique des éléments associé au flux d'énergie électrique est en fait complètement lié aux interactions. Chaque élément pris seul n'a pas de fonctionnalité propre, on ne peut pas définir de variable critère propre à chacun, ni de modèle de composant pour le flux électrique. À ce

niveau de représentation systémique, on n'a qu'un modèle d'interaction à formaliser. Les feuilles sont connectées en parallèle les unes aux autres.

Pour un couple de matériaux donnés pour l'électrode positive et pour l'électrode négative, le potentiel chimique d'oxydo-réduction est une donnée standard. La capacité massique dépend à la fois des matériaux et de la quantité de masses actives déposée sur les électrodes (*cf.* tableau 3-46).

Tableau 3-46 : Modèle d'interaction pour le flux d'énergie électrique (niveau 4)

<table>
<tr><th>Niveau 4</th><th colspan="3">Flux d'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE</th></tr>
<tr><th>VCo</th><th>VCr</th><th>VI</th><th>Modèle d'interaction</th></tr>
<tr><td>• électrode + :
_ matériau, dimensions, nombre
• électrode - :
_ matériau, dimensions, nombre
• séparateur :
_ matériau, dimensions, nombre
• solution électrolytique :
_ matériau, fraction massique dans le séparateur</td><td>U_{fais}
C^0_{fais}</td><td>α
$U°$
$T^{\max}_{bat}$</td><td>• Potentiel d'oxydo-réduction :
$U_{fais} = U°(matériaux)$
• Loi des nœuds : $C^0_{fais} = n_{feuil} \cdot \alpha$
• Capacité d'un triplet d'électrodes et séparateur :
$\alpha = f\left(matériaux, L_{fais}, ép_{él+}, ép_{él-}, ép_{sep}, H_{élém}, \chi, T^{max}_{bat}\right)$</td></tr>
<tr><td colspan="3">Parcimonie Faible → Forte
Exactitude Faible → Forte
Précision Faible → Forte
Spécialisation Forte → Faible</td><td></td></tr>
</table>

La capacité massique est normalement déterminée uniquement par le couple rédox, elle dépend de la masse molaire des éléments et du nombre d'électrons échangés lors de la réaction électrochimique. En fait, différents phénomènes physiques limitent cette capacité.

On a formalisé au niveau 4 un modèle d'interaction faisant apparaître des variables critères cohérentes avec les critères retenus par le cahier des charges. Ce modèle d'interaction spécialisé à l'arrangement des électrodes et de séparateur, tel que nous l'avons déterminé pour le flux d'énergie thermique, constitue le modèle de composant au niveau supérieur, le modèle de composant d'un faisceau pour le flux d'énergie électrique est donc donné par le tableau 3-44 complété des relations formalisées au niveau 4. De la même manière, on peut formaliser ainsi, les modèles de composant au niveau 2 et au niveau 1. Le fait de remonter jusqu'au niveau 1 et de formaliser un modèle de composant pour le bloc de la batterie ne nécessite pas d'adaptation de modèle, car le modèle est assez parcimonieux et les variables et les relations sont cohérentes entre elles pour chaque MI et à chaque niveau.

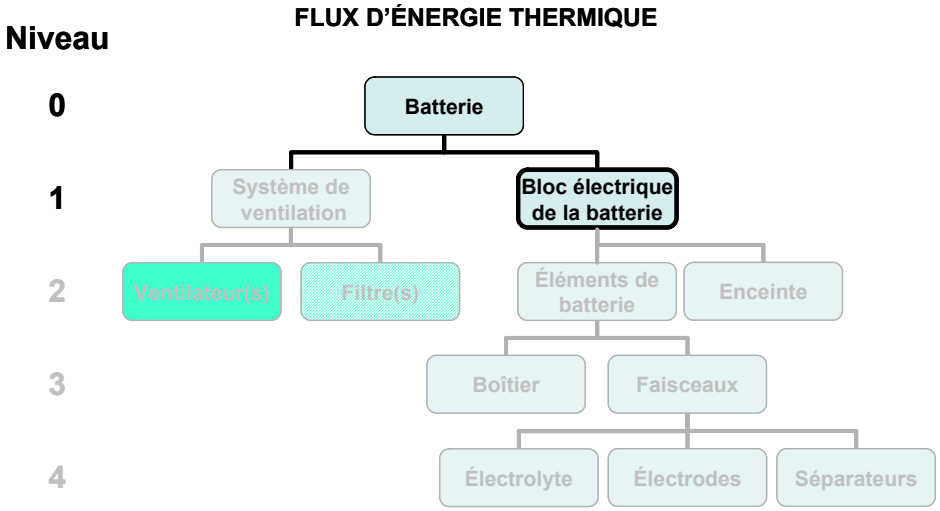


Figure 3-25 : Niveau systémique des modèles de composant retenus pour le flux d'énergie thermique

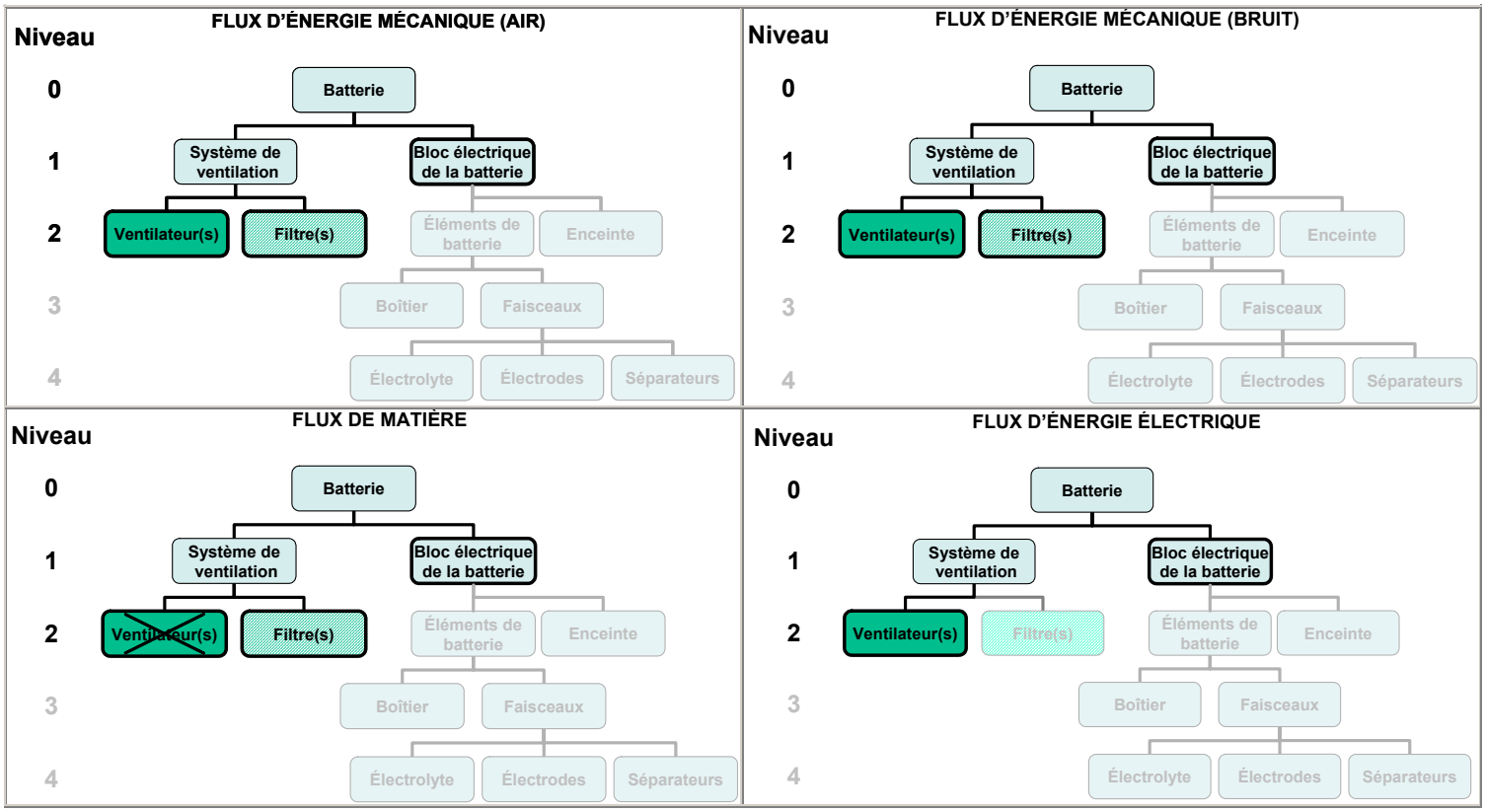


Figure 3-26 : Niveau systémique des modèles de composant retenus pour le flux d'énergie mécanique (air), pour le flux d'énergie mécanique (bruit), pour le flux de matière, pour le flux d'énergie électrique

3 - III BILAN DE LA DÉMARCHE

3 - III.1 Modèle global

Dans un premier temps, on a proposé un modèle de niveau 1 du système, qui impliquait des choix parmi des composants standard. Puis, le modèle de niveau 1 ne convenant pas, nous avons utilisé la démarche pour chaque flux, afin de proposer des modèles adaptés à la conception du système en référence au cahier des charges.

Le modèle global du système est constitué des différents modèles élémentaires (MC et MI) qui ont été retenus à différents niveaux systémiques selon chaque flux. On peut voir sur les figures 3-25 et 3-26, les niveaux de modélisation des modèles de composants retenus pour chacun des flux fonctionnels.

3 - III.2 Validation du modèle global obtenu

3 - III.2.1 Complétude et cohérence du modèle global

On peut constater que la vision systémique et fonctionnelle permet une formalisation systématique et par conséquent complète du modèle global. Ainsi, en considérant chaque flux fonctionnel, on peut examiner quels sont les éléments du système qui modifient ce flux. Il est nécessaire ensuite de vérifier que chaque élément qui modifie le flux a bien été pris en compte dans le modèle. Si ce n'est pas le cas, il est nécessaire de s'interroger sur le fait qu'il n'existe pas de MC pour un élément donné. Le risque de conception lié à l'utilisation du modèle global est alors influencé par cette absence de modèle au travers de l'exactitude du modèle global.

Par exemple, pour le flux de matière (FM), il n'existe pas de modèle dans la littérature permettant de formaliser de MC pour le ventilateur, les géométries du ventilateur et des écoulements étant trop compliquées. On aurait pu tenter de formaliser un modèle de composant en descendant dans les niveaux systémiques. Il aurait fait intervenir la géométrie et les composants du ventilateur. Cependant, du fait de la complexité des écoulements il aurait fallu formaliser un modèle à la fois fortement spécialisé et très peu parcimonieux, qui aurait nécessité une adaptation du modèle (*e.g.* approximation de modèles). L'autre approche, que nous avons choisie, consiste à considérer un modèle de composant pour le ventilateur à ce niveau qui estime le dépôt de poussières ou le néglige. Ainsi, le choix du modèle à un niveau donné – ou plutôt, l'absence de modèle dans le cas où on néglige l'influence du ventilateur sur le FM – est ensuite qualifié au travers de l'exactitude du modèle global. Le risque de conception lié à la modélisation est évalué au travers de la perte d'exactitude.

La cohérence du modèle global a été assurée du fait qu'on a formalisé les modèles d'interaction de manière découplée.

3 - III.2.2 Qualification du modèle global

La qualification du modèle global est présentée dans le chapitre 5.

3 - IV CONCLUSION

On a appliqué la démarche de formalisation de modèles au problème de conception préliminaire d'une batterie de véhicule électrique. Ce chapitre a permis de montrer qu'il était possible de formaliser plusieurs modèles d'aide à la décision, et que le cadre de formalisation basé sur l'identification des différents types de variables (VCo, VCr) et de modèles (MC, MI), sur la qualification des modèles à l'aide du PEPS et les outils de l'analyse fonctionnelle permet d'aider à la formalisation d'un modèle cohérent avec les objectifs de conception et le cahier des charges.

La méthode que nous proposons est une démarche qui se veut à la fois systématique et complète. Elle peut cependant apparaître au premier abord assez lourde et longue à mettre en œuvre. Ceci provient du fait que nous avons souhaité faire preuve de pédagogie par l'intermédiaire de l'exemple de la batterie. Or, l'expérience et la connaissance du système du concepteur doivent lui permettre d'identifier plus rapidement les niveaux systémiques auxquels il peut formaliser des modèles cohérents avec le cahier des charges et les objectifs de conception en terme de PEPS. Par exemple, pour la formalisation du modèle associé au flux électrique, il sait par expérience fournir des modèles de composant explicites, éventuellement à plusieurs niveaux différents, permettant de déterminer la tension ainsi que la capacité d'un faisceau ou d'un élément de batterie en fonction des variables de conception. Par conséquent, les habitudes de calcul, ainsi que la connaissance de modèles doivent permettre à un concepteur de se placer aux niveaux de modélisation adaptés rapidement.

Le fait de proposer une représentation systématique et rigoureuse du système afin de conduire à la formalisation d'un modèle global constitue un avantage de la démarche. En effet, on peut envisager à terme une forme d'automatisation de la démarche de formalisation de modèles, en couplant par exemple, un logiciel du type MAL'IN® qui permet de faire une analyse du système à l'aide d'outils de l'analyse fonctionnelle et de la théorie TRIZ à une base de données de modèles de composants qualifiés. Les graphes d'associations substances-champs sont plus complets que les blocs diagrammes fonctionnels, puisqu'ils font intervenir des verbes d'actions. À terme on peut envisager d'automatiser en partie la formalisation des modèles d'interaction en associant des modèles d'interaction à des verbes et des modèles de composant à des noms de blocs fonctionnels. Le choix d'un modèle étant conditionné par la structuration des modèles à l'aide des variables de conception et critères et par la cohérence du PEPS des modèles avec les objectifs de la modélisation.

La démarche nous paraît également être un cadre favorable à la capitalisation de modèles pour la conception préliminaire, en utilisant et en maintenant au fur et à mesure une base de données de modèles de composants. Chaque modèle de composant formalisé peut être repéré à la fois par le niveau systémique auquel il est rattaché, par les variables critères et les variables de conception qu'il met en œuvre, ainsi que par son PEPS, qui peut renseigner sur l'adéquation de chaque modèle au besoin. Le niveau de modélisation, les variables structurantes (VCo, VCr) et le PEPS du modèle permettent ainsi de compléter le modèle avec le contexte dans lequel il a été formalisé[1]. La base de modèles peut également être complétée de catalogues constructeurs permettant de formaliser des modèles de composants standard et faire des choix de composants.

Nous discutons dans le chapitre suivant de la manière d'estimer le PEPS d'un modèle de manière objective.

[1] Il est à noter que le PEPS étant indissociable des hypothèses énoncées pour formaliser le modèle, le contexte du modèle doit nécessairement être accompagné des hypothèses, ce qui n'est pas spécifique à notre démarche.

CHAPITRE 4

QUALIFICATION de MODÈLES :

PARCIMONIE, EXACTITUDE, PRÉCISION, SPÉCIALISATION

OBJECTIFS :

Nous avons montré l'importance de la qualification au cours de la modélisation. La qualification permet de vérifier l'adéquation d'un modèle avec les objectifs de modélisation et éventuellement de faire un choix entre différents modèles d'un même système. Nous avons également défini les 4 critères pertinents de la qualification (PEPS). La sélection d'un modèle en conception préliminaire doit se faire au regard de sa capacité intrinsèque à produire une aide à la décision, qui peut être estimée au travers de l'évaluation de son PEPS. Cette évaluation fait l'objet de ce chapitre dans lequel la mise en œuvre de la qualification des modèles est détaillée. Nous rappelons la définition de chaque paramètre, puis nous en proposons une procédure d'estimation. La démarche choisie est ensuite analysée et critiquée. Enfin, nous montrons quels sont les liens qui existent entre les 4 paramètres.

4 - I VÉRIFICATION ET VALIDATION DE MODÈLES (V&V)

La vérification et la validation (V&V) des modèles de simulation ont pris une place de plus en plus importante dans le processus de modélisation au fur et à mesure que l'utilisation des modèles s'est généralisée. La validation de modèle consiste à vérifier qu'un modèle, pour un domaine d'application donné, possède un niveau d'exactitude (*accuracy*) satisfaisant et cohérent avec l'application visée du modèle ; la vérification permet de s'assurer qu'un modèle informatisé et son implémentation sont corrects [Sargent, 2001]. De nombreux travaux ont mis l'accent sur le fait qu'il est nécessaire de se poser le problème de la validité du modèle dès le début du processus de modélisation. [Balci, 1998, Sargent, 2000] présentent des synthèses de ces travaux. La justification qu'un modèle est valide ou non doit donc se faire tout au long du développement d'un modèle (cf. figure 4-1).

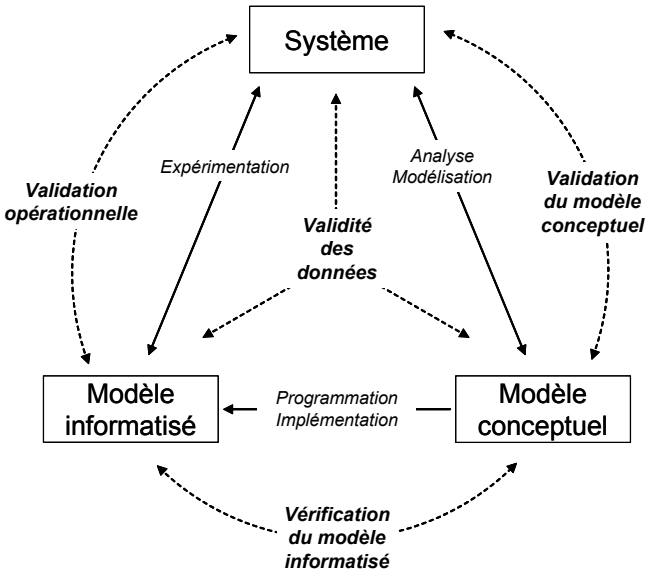


Figure 4-1 : Représentation simplifiée du processus de développement de modèles [Sargent, 1999]

[Sargent, 1999] distingue 4 tâches à réaliser en fonction des étapes de modélisation, chacune faisant appel à des techniques qui lui sont propres : la validité du modèle conceptuel, la vérification du modèle, la validité opérationnelle et la validité des données.

- Vérifier la validité d'un modèle conceptuel consiste à s'assurer que la structure, la représentation et les hypothèses sous-jacentes au modèle sont cohérentes avec le système modélisé et les objectifs de la modélisation. La phase d'analyse du modèle présentée dans la démarche au chapitre 2 répond à cet objectif de validation.
- Nous avons également abordé la validation de la syntaxe du modèle en fonction de l'outil de traitement, qui fait référence à la vérification du modèle.
- Enfin, la validité opérationnelle du modèle rejoint par certains aspects ce que nous avons défini comme la qualification du modèle. En particulier, l'exactitude se rapporte au système modélisé et peut donc être interprétée comme une façon d'estimer la validité opérationnelle du modèle qualifié.

Nous ne détaillerons pas les principes et techniques de validation de modèles recensés par Balci et Sargent [Balci, 1998, Sargent, 2001] dans la mesure où ils sont plutôt adaptés aux modèles de simulation statistiques, *i.e.* des modèles qui font appel à des notions probabilistes (tests d'hypothèse, paramètres aléatoires, distributions de probabilités, etc.). En outre, certaines techniques font seulement appel à des raisonnements de sens commun et à l'expérience de la personne qui formalise le modèle, et ne nécessitent pas de développement, comme par exemple :

- L'analyse de sensibilité : est-ce que les variations du modèle semblent raisonnables et physiquement correctes ?
- Les tests de Turing : est-ce qu'un expert fait la différence entre les résultats fournis par le modèle et le comportement réel du système ?

En revanche, les procédures que nous proposons tiennent compte de certaines remarques faites dans les différentes communications sur les méthodes de V&V présentées précédemment, et des principes édictés par [Balci, 1998]. En particulier, nous retenons :

- que le résultat de la validation d'un modèle de simulation ne doit pas être considéré comme une réponse binaire indiquant que le modèle est absolument juste ou absolument faux.
- qu'un modèle de simulation est réalisé en fonction de buts précis et la crédibilité qui lui est accordée doit être examinée relativement à chacun de ces objectifs.
- qu'il est impossible de réaliser une validation complète d'un modèle de simulation.

La qualification des modèles que nous proposons a pour but de comparer des modèles entre eux et non d'affirmer qu'un modèle est « correct » ou « incorrect ».

Elle se fait sur chacun des 4 paramètres que nous avons retenus.

Nous proposons dans la suite de ce chapitre des stratégies de validation cohérentes avec notre démarche.

4 - II PARCIMONIE

Il est difficile d'évaluer la complexité d'un modèle dans le cadre général. Souvent, la parcimonie d'un modèle est appréciée au travers de l'interprétation de certains critères dépendants de l'outil de traitement. Par exemple, dans le cadre de modèles numériques, elle est interprétée au travers du temps de calcul sur une machine donnée ou de la taille mémoire occupée par le modèle. Cet exemple montre que, la parcimonie n'est qu'interprétée au travers du coût de traitement du modèle qui dépend de l'exploitation du modèle. Or, notre objectif est d'évaluer la parcimonie d'un modèle indépendamment de l'outil, car c'est, selon nous, une caractéristique intrinsèque du modèle.

Nous montrons dans cette section comment il est possible d'estimer une forme de complexité intrinsèque aux modèles dans le cadre particulier des modèles traités ici, c'est-à-dire des relations algébriques et analytiques.

4 - II.1 De la complexité à la parcimonie

La complexité des modèles de simulation numérique, qu'ils soient du type éléments, différences ou volumes finis, est généralement estimée au travers des caractéristiques des outils et des algorithmes de traitement utilisés pour les résoudre. Elle peut être estimée par l'intermédiaire de plusieurs critères parmi : le nombre d'étapes de calcul, le temps d'exécution, l'occupation de la mémoire ou des mesures dépendantes de l'architecture du processeur. En informatique, la théorie de la complexité [Wolper, 2001] a permis d'uniformiser cette mesure, en associant la complexité des algorithmes au nombre d'opérations élémentaires nécessaires à l'exécution de celui-ci. Le nombre d'opérations dépend généralement de la taille des données à traiter. Les complexités des algorithmes sont comparées en utilisant une notation asymptotique. On décrira par exemple la complexité d'un algorithme par $O(n^2)$, pour signifier que le nombre d'opérations requis pour son exécution varie comme n^2 quand le nombre caractéristique de variables n devient grand [Lascaux et Théodor, 1986][1]. La complexité des modèles est souvent réduite à leur seule taille et plus particulièrement à la taille des matrices ou aux nombres de nœuds des maillages (degrés de liberté). Des travaux de recherche ont été menés sur la réduction de modèles, dont l'enjeu est de simplifier des modèles éléments finis en réduisant le nombre de degrés de liberté [Ryckelynck, 2002, Madelaine, 1998]. Battaglia [Battaglia, 2002] présente ainsi deux techniques de réduction de modèles pour la caractérisation de flux thermiques par méthode inverse : la réduction de la base modale d'un modèle par éléments finis et l'identification de paramètres de modèles à dérivées non entières. Dans ces cas précis, la réduction de la complexité des modèles consiste à réduire la taille des matrices, donc le nombre de variables, des modèles.

[1] Il est à noter que la complexité d'un algorithme estimée telle que nous le présentons est sa complexité théorique. En pratique, le coût de traitement d'un algorithme sera toujours inférieur au coût indiqué par sa complexité.

Les travaux de recherche dans le domaine de l'approximation de modèles ont connus ces dernières années des développements importants liés à l'utilisation des réseaux de neurones artificiels [Dreyfus, 1998] comme des fonctions permettant de réaliser des modèles de régression mathématique. Cette communauté de recherche distingue généralement trois types de modèles [Hugget, 1998, Dreyfus et al., 2004] : les modèles « boîtes noires », les modèles de connaissance et les modèles « boîtes grises » ou semi-physiques. Les modèles de connaissance désignent les modèles mathématiques établis par l'intermédiaire d'une analyse structurelle des phénomènes étudiés et font parfois intervenir des paramètres ajustables mais ayant un sens physique. Un modèle « boîte noire » est un modèle établi dans le but de déterminer une relation entre les variables caractéristiques d'un phénomène. Cette relation est établie uniquement sur la connaissance de différentes valeurs mesurées ou simulées que l'on cherche à approcher en ajustant les paramètres des fonctions choisies. Les réseaux de neurones ont connu un essor important dès lors qu'il a été démontré formellement qu'une des caractéristiques fondamentales des réseaux de neurones étaient leur propriété d'approximateurs universels parcimonieux [Hornik, 1989, Hornik, 1994]. Cette propriété signifie qu'à précision égale, le nombre de paramètres à ajuster pour les réseaux de neurones augmente de manière linéaire avec le nombre de variables considérées pour la relation à approcher, quand il augmente exponentiellement pour la plupart des fonctions d'approximations (régression multi-linéaire, polynômiale, etc).

Le principe de parcimonie découle du rasoir d'Occam [Hoffmann et al., 1997][2] ; il est souvent interprété comme recommandant de choisir préférentiellement la solution la plus simple quand plusieurs solutions fournissent des résultats identiques. De nombreux travaux statistiques ont tenté de mettre ce principe en application pour la sélection de modèles de régression, en partant de l'observation suivante : lorsqu'on augmente le nombre de points d'approximation, la plupart des modèles d'approximation diminuaient l'erreur de modélisation tout en augmentant l'erreur de généralisation du modèle. Des critères et des tests d'hypothèse statistiques (critère d'Akaike [Akaike, 1974], maximum de vraisemblance) ont ainsi été définis afin de faire une sélection en tenant compte à la fois de l'erreur de modélisation et de la parcimonie du modèle à sélectionner [Forster, 2000].

La parcimonie traduit donc une échelle inverse de la complexité. Puisque le temps et le coût de développement d'un produit sont des facteurs non négligeables en conception préliminaire, il nous paraît inévitable de choisir, entre deux modèles remplissant le même besoin (à exactitude, précision et spécialisation égale), celui dont le coût de traitement sera le moindre.

Les problèmes de satisfaction de contraintes sont des problèmes dits NP-complets [Sam, 1995]. Cela signifie que la recherche exacte de solutions de tels problèmes ne peut être réalisée à l'aide

[2] Dans une de ses formes, le rasoir d'Occam (ou Ockham) énonce que « les entités ne doivent pas être multipliées plus qu'il n'est nécessaire ».

d'algorithmes de complexité polynomiale[3]. Les temps de résolution de manière exacte de tels problèmes croissent exponentiellement en fonction du nombre de variables ; c'est pourquoi il nous paraît intéressant de lier la parcimonie des modèles au nombre de variables.

4 - II.2 Procédure d'estimation de la parcimonie

Dans le cadre de la démarche proposée, nous cherchons à n'obtenir que des modèles sous forme algébrique et analytique qui puissent être résolus à l'aide d'un solveur de PSC numériques.

Nous choisissons donc d'estimer la parcimonie de manière simple : l'inverse du nombre de relations et de variables impliquées dans le modèle fournira une estimation de la parcimonie des modèles.

$$Pa = \frac{1}{n_{éq^{os}} + n_{var}}$$

Ainsi, les modèles présentant un grand nombre de variables et d'équations sont moins parcimonieux.

4 - II.3 Analyse

L'estimation proposée de la parcimonie est critiquable sur plusieurs points.

La mesure proposée suppose que l'on peut résumer la complexité des modèles algébriques et analytiques à un nombre de variables et de relations sur les variables. Cette définition ne tient pas compte de la forme des relations qui relient les variables. Elle ne distingue pas les relations qui font intervenir des « couplages forts » entre variables, ni le fait qu'un ensemble de relations sont linéaires ou non.

Cette définition n'est valable que dans le cadre précis de modèles formalisés par des relations algébriques sur les variables. Cette façon de caractériser la parcimonie n'est donc possible que dans le cas particulier dans lequel nous nous plaçons. Par exemple, pour une équation différentielle, une seule équation permet de caractériser les valeurs d'une grandeur en tout point. On a donc un formalisme très parcimonieux. En revanche, on ne peut pas exploiter de la même manière, une telle équation, qui nécessite d'être résolue, et imposera nécessairement de spécialiser le système modélisé (géométrie, conditions aux limites). On ne peut donc pas généraliser cette définition de la parcimonie à tous les types de formalisation de modèles, par conséquent, on se contentera uniquement de comparer la parcimonie de modèles algébriques et analytiques entre eux.

Dans le cadre de la recherche de solutions d'un problème de satisfaction de contraintes à l'aide de Constraint Explorer, la taille des domaines de variation des variables influence le coût de traitement de l'algorithme de recherche. On s'aperçoit donc que la parcimonie telle que nous l'évaluons peut définir une estimation de la complexité propre à un modèle, mais elle ne peut donner d'indication fiable du coût de traitement du modèle, puisqu'il dépend également des domaines de valeurs initiaux des variables du modèle.

[3] En pratique, la recherche de solutions approchées d'un PSC peut être réalisée à l'aide d'algorithmes de complexité polynomiale par rapport au nombre de variables, puisque la complexité NP est la complexité théorique, *i.e.* dans le pire des cas.

En outre, cette mesure peut être variable pour un même modèle, puisqu'elle dépend potentiellement de la formulation du modèle. Dans le cadre particulier de la formalisation par contraintes, il est parfois plus aisé de résoudre le modèle d'un problème de satisfaction de contraintes en le transformant en un modèle équivalent constitué uniquement de contraintes binaires[4] [Bacchus et al., 2002, Stergiou, 2002]. De plus, Borrett [Borrett, 1998] montre qu'il est possible de trouver un grand nombre de formulations par contraintes différentes pour un même PSC, et que le choix d'une représentation pour un problème peut avoir des effets non négligeables sur l'efficacité de la résolution [Borrett et Tsang, 2001]. Il discute dans sa thèse de la meilleure formulation du modèle à adopter en vue de la résolution d'un problème par contraintes. Enfin, [Lottaz, 1999] montre comment on peut reformuler un problème PSC numérique en un problème de contraintes ternaires, en faisant intervenir des variables auxiliaires.

Indépendamment de l'outil utilisé pour la résolution du modèle, on peut montrer de manière plus naturelle sur un exemple, qu'une relation entre plusieurs variables peut s'écrire de différentes manières à l'aide de plusieurs contraintes et en multipliant également le nombre de variables (*cf.* tableau 4-1 et figure 4-2). Il est à noter, sur cet exemple, que les simplifications effectuées n'ont impliqué que des variables intermédiaires de calcul, et qu'on n'a supprimé aucune variable critère, ni aucune variable de conception.

Tableau 4-1 : Deux formulations différentes pour un même modèle de calcul des pertes de charge et du transfert de chaleur dans une conduite de section constante, selon l'analogie de Colburn, pour un écoulement turbulent

	Modèle 1	Modèle 2
Pertes de charge	$\Delta P = f \cdot \frac{A}{S} \cdot \frac{G^2}{2\rho}$ $f = 0{,}046 \cdot Re^{-0{,}2}$ $Re = \frac{4 \cdot G \cdot S \cdot L}{\mu \cdot A}$	$\Delta P = 0{,}046 \cdot \left(\frac{4 \cdot G \cdot S \cdot L}{\mu \cdot A} \right)^{-0{,}2} \cdot \frac{A}{S} \cdot \frac{G^2}{2\rho}$
Transferts de chaleur	$\Phi = h \cdot A \cdot \left(T - T_p \right)$ $h = G \cdot C_p \cdot J \cdot Pr^{-\frac{2}{3}}$ $J = \frac{f}{2}$	$\Phi = G \cdot C_p \cdot 0{,}023 \cdot \left(\frac{4 \cdot G \cdot S \cdot L}{\mu \cdot A} \right)^{-0{,}2} \cdot Pr^{-\frac{2}{3}} \cdot A \cdot \left(T - T_p \right)$
Parcimonie	**1/23**	**1/14**

[4] Une contrainte peut être caractérisée par son arité. L'arité est définie comme le nombre de variables qui sont mises en relation par l'intermédiaire d'une contrainte. On définit une contrainte unaire comme une relation portant sur une seule variable, une contrainte binaire comme une relation entre deux variables.

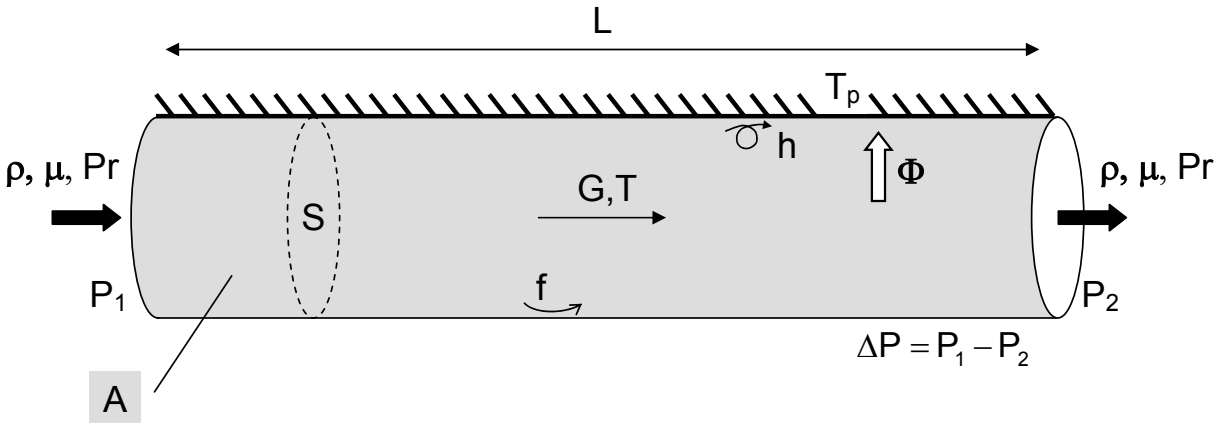


Figure 4-2 : Schéma illustrant les variables du modèle

Par conséquent, pour un modèle formalisé donné, on peut rencontrer différentes formulations, qui feront intervenir un nombre de variables et de relations différent pour chaque formulation. On s'aperçoit donc qu'il existe une certaine ambiguïté liée à la formulation des modèles, qui n'est pas sans avoir de conséquences sur la mesure de la parcimonie.

Cependant, cette définition présente plusieurs avantages. En premier lieu, elle permet d'estimer la parcimonie des modèles de manière simple, presque immédiate et de ne nécessiter aucun outil complexe de calcul. Cette mesure est donc indépendante de l'outil de traitement utilisée et des facteurs matériels. Ainsi, elle permet une comparaison rapide des modèles. La démarche que nous avons mise en place a pour objectif d'aider à la formalisation de modèles parcimonieux. Il était donc important de pouvoir proposer un outil de comparaison simple et rapide, en cohérence avec la démarche ; la qualification des modèles ne doit pas être trop coûteuse. Enfin, l'évaluation des performances d'un modèle de comportement en conception préliminaire n'est pas liée, selon nous, uniquement au coût de traitement du modèle mais doit être également évaluée sur les trois autres paramètres.

Nous choisissons d'évaluer la parcimonie des modèles au travers de l'inverse du nombre de variables et de relations d'un modèle.

4 - III EXACTITUDE ET PRÉCISION

4 - III.1 Pourquoi les distinguer ?

Nous pensons qu'il est nécessaire de distinguer l'exactitude de la précision intrinsèques à un modèle. De manière générale, ces deux termes, qu'ils concernent des mesures expérimentales ou des résultats de simulation engendrent des confusions. Par exemple, on accorde souvent une crédibilité accrue à la résolution d'un modèle qui présente des résultats plus précis, alors que son exactitude intrinsèque n'est pas nécessairement liée à cette précision. De surcroît, les termes anglais sont souvent traduits de manière intervertie.

Bevington et Robinson [Bevington et Robinson, 2002] explicitent ces termes :
« L'exactitude (*accuracy*) mesure à quelle **distance de la valeur réelle** se situe le résultat d'une expérience. La précision (*precision*) est une mesure de la justesse avec laquelle le résultat est déterminé **sans aucune référence** à la valeur réelle. »

4 - III.2 Exactitude

4 - III.2.1 Notre définition

On a parfois tendance à croire que plus un modèle est complexe (et donc moins il est parcimonieux), plus il reflète la réalité avec exactitude. Cet exemple montre que l'exactitude, au même titre que la parcimonie, peut être interprétée de diverses manières. Nous prenons le parti de définir une mesure de la validité des modèles au travers de l'estimation d'un paramètre que nous définissons comme l'exactitude d'un modèle. Il faut garder à l'esprit que cette mesure n'est qu'une estimation de l'exactitude intrinsèque du modèle. Nous définissons l'exactitude d'un modèle d'après [Travé-Massuyès et al., 1997].

L'exactitude est *une mesure de la distance* entre *l'espace des solutions du modèle* et un *comportement de référence*.

Chaque terme de cette définition entraîne plusieurs difficultés liées à la détermination de cette distance :

- en premier lieu, comment caractérise-t-on l'espace des solutions d'un modèle ?
- ensuite, comment choisit-on la référence et comment caractérise-t-on son comportement ?
- et enfin, comment définit-on une mesure de la distance et comment la détermine-t-on ?

4 - III.2.2 Espace des solutions du modèle à qualifier

Étant donnée la nature algébrique des modèles formalisés grâce à notre démarche, il n'existe pas a priori de variables d'entrée, ni de variables de sortie. Néanmoins, nous avons choisi dans ce travail de structurer le modèle d'un système en conception préliminaire autour de deux types de variables : les variables de conception et les variables critères. Le modèle doit permettre de faire un choix, à partir de différentes combinaisons de valeurs des VCo, en s'appuyant sur les valeurs des VCr calculées. Par conséquent, la structuration du problème de modélisation par l'intermédiaire des VCo et des VCr permet de donner au calcul une forme de causalité, indépendamment de l'outil de traitement utilisé : les variables de sortie sont les VCr. Les variables d'entrée sont d'abord les VCo, puis les VI qui permettent de déduire la totalité des valeurs des VCr. Cet ensemble de variables n'est pas aisé à déterminer, pour notre part nous utilisons l'outil du graphe causal de Constraint Explorer. Le graphe de causalité permet de déterminer un ordre partiel du calcul des variables, il sert également lors de la résolution du PSC à donner l'ordre d'instanciation des variables. Grâce au graphe de causalité, on détermine les variables dont il faut fixer la valeur pour déduire les valeurs des VCr.

L'espace des solutions du modèle à qualifier est structuré grâce à la distinction entre les variables de conception et les variables critères du modèle.

a. Variables de comparaison

L'estimation de l'exactitude d'un modèle doit se faire en comparant les valeurs prédites par le modèle aux valeurs issues de la référence.

L'exactitude d'un modèle est liée à des variables particulières dont la valeur est d'un intérêt dominant pour l'aide à la décision en conception, pour lesquelles on souhaite avoir un degré d'exactitude suffisamment important afin de réaliser des choix de conception. Dans le cadre de notre travail, ce sont les variables critères qui servent de comparaison pour chaque flux fonctionnel auquel le cahier des charges fonctionnel associe un niveau de performance. Un modèle doit être validé par rapport à chacun de ses objectifs. L'exactitude doit donc être évaluée sur chacune des variables critères de niveau 0.

On peut être amené à qualifier des modèles locaux en comparant les valeurs de certaines variables critères de niveaux inférieurs à 0 ou même certaines variables intermédiaires des modèles aux VI de la référence. Ceci peut permettre d'identifier des erreurs de modélisation, des hypothèses réductrices et éventuellement de guider pour proposer des modifications ou des améliorations dans le modèle global.

Les variables critères sont les variables de comparaison, sur lesquelles est évaluée l'exactitude du modèle.

b. Variables d'entrée

Une solution du modèle est caractérisée par une combinaison de valeurs prises par chacune des variables du modèle. Par conséquent, l'espace des solutions du modèle n'est a priori pas fini. Deux alternatives sont alors possibles pour caractériser l'exactitude du modèle :

- soit on évalue l'exactitude pour une seule combinaison de valeurs des variables du modèle : on suppose alors que l'estimation en ce « point » est suffisante pour approcher l'exactitude du modèle sur l'ensemble de l'espace des solutions,
- soit on tente d'estimer l'exactitude sur l'ensemble de l'espace des solutions.

Il est préférable, afin de limiter les risques de conception, d'évaluer au mieux l'exactitude, et donc de comparer les valeurs des variables critères sur la plus grande étendue possible de l'espace des solutions. Cependant, il est impossible de valider de manière absolue le modèle sur l'ensemble de son domaine d'application, puisque ce serait trop long et trop coûteux en termes de calculs et d'essais [Sargent, 2001]. La comparaison du modèle avec la référence doit donc se faire en un nombre fini de points. Or, la fiabilité d'un modèle ne peut être avancée que pour les conditions dans lesquelles le modèle est testé [Balci, 1998]. Cela signifie qu'il est nécessaire de définir une stratégie de qualification de l'exactitude pour couvrir un maximum de points de l'espace de conception[5]. On peut laisser au concepteur la liberté sur le choix des « points » du domaine de variation où évaluer l'exactitude, de par l'expertise qu'il pos-

[5] On peut remarquer que plus un modèle est spécialisé, plus il est probable que l'estimation de son exactitude soit correcte, puisque cet espace est plus restreint.

sède sur le système. Cependant, cette stratégie est très similaire à la notion de compromis qui doit être trouvé entre le coût et l'explication des phénomènes pour une série d'expérimentations. Les plans d'expériences peuvent donc être une aide pour définir cette stratégie.

Le choix du plan d'expériences peut être fait parmi les plans classiquement utilisés. Cependant, si la référence utilisée est également un modèle, on peut faire le choix d'un plan plus adapté aux modèles de simulations déterministes [Meckesheimer, 2001, Simpson et al., 2002, Sacks et al., 1989]. En effet, la plupart des plans d'expériences classiques répètent des expériences à certains points ou proposent des combinaisons dont le but est de limiter les effets des erreurs (*e.g.* erreurs de mesure). Or, les modèles avec lesquels nous travaillons sont des modèles déterministes, *i.e.* que pour deux simulations dans les mêmes conditions, les modèles fournissent les mêmes résultats. Dans ce cadre précis, il peut être utile d'utiliser des plans d'expériences différents, plus adaptés aux modèles de simulation, appelés plans d'expériences numériques (*Design and Analysis of Computer Experiments* [Booker, 1998]) : hypercube latin, plans uniformes, matrices orthogonales, etc. Ces plans d'expériences visent plutôt à couvrir au maximum les domaines de variation des variables (facteurs) et donc de l'espace de recherche des solutions (cf. figure 4-3) en intégrant des contraintes d'uniformité de l'occupation des domaines de l'espace (*space-filling*).

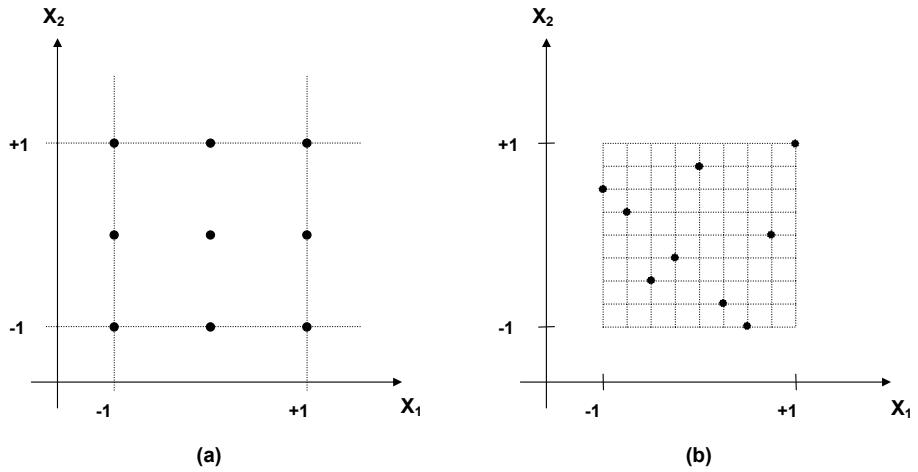


Figure 4-3 : Plans d'expériences à deux facteurs (X1 et X2) de 9 simulations chacun : (a) plan composite à faces centrées, (b) un plan basé sur les méthodes d'échantillonnage hypercube latin [Meckesheimer, 2001]

Les variables de conception et certaines variables intermédiaires du modèle sont les variables d'entrée, elles définissent les points de l'espace des solutions qui servent de comparaison entre le modèle et la référence.

Afin d'étudier leur influence sur l'exactitude, on peut définir une stratégie pour couvrir l'ensemble de l'espace des solutions.

4 - III.2.3 Référence

a. Comment choisit-on la référence ?

Nous rappelons que la référence pour qualifier un modèle peut être :

- une instance (*e.g.* un prototype) du système modélisé, on peut alors valider le modèle par rapport aux résultats d'essais disponibles ou à réaliser,
- un modèle existant et réputé exact pour un domaine de validité clairement défini,
- un modèle existant constituant une référence dans le domaine (nous donnons en annexe 3, une liste non exhaustive des codes professionnels de calcul pouvant servir de référence).

b. Quelles grandeurs de comparaison choisir ?

L'exactitude d'un modèle est estimée en comparant les valeurs obtenues à partir du modèle et celles liées à la référence pour les variables critères choisies. Il se peut que les variables critères de la référence soient différentes de celles du modèle à qualifier ou inexistantes dans certains cas. Il peut donc être nécessaire d'adapter soit les valeurs issues de la référence, soit celles calculées par l'intermédiaire du modèle qualifié. Dans les deux cas, il faut définir des grandeurs comparables entre le modèle à qualifier et la référence.

Cependant, le choix d'un critère d'appréciation dans le cahier des charges est le résultat de l'expertise du concepteur : ce choix résulte d'une connaissance liée aux valeurs attendues de la variable critère. Par conséquent, la référence – qu'elle soit un modèle ou des résultats d'essais – présente nécessairement des critères équivalents. D'une manière générale, on peut donc trouver des grandeurs comparables, même si certains calculs préalables sont nécessaires avant de pouvoir comparer le modèle qualifié et la référence. Dans le cas où on ne peut pas comparer des grandeurs analogues, il faut soit se résoudre à ne pas proposer d'estimation de l'exactitude, soit proposer une estimation subjective liée à l'expérience du concepteur et aux hypothèses faites pour formaliser le modèle.

De manière analogue, pour les variables de conception, les variables d'entrée peuvent être différentes des VCo. Si la référence est un modèle ou à cause de contraintes expérimentales, les différents points de comparaison du modèle et de la référence ne font pas nécessairement intervenir certaines VCo dont on aurait souhaité connaître l'influence sur l'exactitude. Cela montre une nouvelle fois que l'exactitude ne sera qu'une estimation sur une partie du domaine d'application du modèle qualifié.

Le choix des variables de comparaison et des variables d'entrée doit se faire conjointement pour le modèle et la référence choisie.

4 - III.2.4 Mesure de la distance

[Meckesheimer, 2001] fait une analyse assez exhaustive des différentes questions que soulève l'approximation de modèles. À ce titre, il passe en revue les différents types de calcul d'erreur pouvant être utilisées afin de valider un métamodèle (modèle d'approximation). Nous donnons ici un bref aperçu de certaines mesures d'erreur et de différents critères d'estimation de la distance entre le modèle et la référence. Dans ce qui suit, on note $\widetilde{X}_i$ la valeur en un point « i » de l'espace des solutions d'une variable critère du modèle que l'on cherche à qualifier, et X_i la valeur d'une grandeur comparable à $\widetilde{X}_i$ obtenue à l'aide de la référence (mesurée ou calculée).

Les critères d'estimation de l'exactitude peuvent être des critères **locaux** ou **globaux**.

- Une **estimation locale** de l'erreur peut être donnée par exemple, par l'intermédiaire du maximum ou du minimum de l'erreur absolue aux points mesurés, ou plus simplement, par l'erreur en un point particulier. Ce type de mesure ne renseigne que localement sur l'exactitude du modèle, en particulier pour le maximum, sur les valeurs extrêmes.
  - erreur maximale : $E_M = \max_i \left| \widetilde{X}_i - X_i \right|$, etc.
- D'autres critères d'erreur peuvent être utilisés, ils confèrent à l'erreur ainsi déterminée **un caractère global**. Le calcul de l'erreur quadratique permet par exemple d'obtenir une tendance générale de l'erreur sur l'ensemble de l'espace des solutions, mais elle peut être biaisée par les valeurs extrêmes de l'erreur. En outre, certaines mesures seront plus sensibles que d'autres aux valeurs extrêmes. Ces critères permettent également de fournir une appréciation de la dispersion de l'erreur s'ils sont comparés à une mesure locale. On peut donner par exemple :
  - erreur moyenne : $\overline{E} = \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{n} \left| \widetilde{X}_i - X_i \right|$,
  - écart quadratique moyen : $eqm = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \frac{1}{n} \left(\widetilde{X}_i - X_i \right)^2}$, etc.

Nous avons donné des définitions des erreurs basées sur une erreur absolue, on peut également utiliser une erreur relative ou même une erreur signée qui sera soit positive si le modèle surévalue la valeur, soit négative si elle est sous-évaluée. Une erreur relative sera rapportée à la valeur de la référence. On pourrait donner également d'autres critères statistiques (médiane, etc.) permettant de proposer une mesure ou une échelle de mesure de l'exactitude ; mais l'objectif de notre démarche est de proposer un guide systématique de formalisation de modèles parcimonieux, les procédures de qualification de modèles doivent donc rester cohérentes avec l'esprit de la démarche et ne pas être trop coûteuse à réaliser.

Notre choix de la mesure de distance pour estimer l'exactitude s'est porté sur le critère de l'erreur maximale, car le choix d'un critère d'erreur global augmente le risque de sous-estimer l'exactitude du modèle, puisqu'il a tendance à minimiser l'influence des valeurs extrêmes. En outre, il est nécessaire de

proposer une mesure d'exactitude qui convienne également dans le cas où le modèle à qualifier ou la référence fournissent des résultats en contexte imprécis.

Nous montrons au paragraphe 4 - III.3, que dans le cadre des modèles que nous traitons, nous estimons la précision intrinsèque d'un modèle par l'intermédiaire du formalisme des intervalles [Moore, 1966]. Nous choisissons de ne conserver que la mesure d'erreur maximale (pour une erreur relative ou absolue), car le calcul sur les intervalles ne conserve pas les mêmes propriétés que les opérations élémentaires sur les réels. Par exemple, la multiplication n'est plus distributive par rapport à l'addition. Ainsi, il serait dangereux d'utiliser des mesures d'erreur du type erreur quadratique, en les étendant à l'algèbre des intervalles, puisque cela pourrait conduire à des intervalles trop larges et difficiles à interpréter en terme d'exactitude.

Nous choisissons de définir la mesure de distance pour l'exactitude comme le maximum de l'erreur sur l'espace des solutions. Ce choix est justifié, car :

- **elle ne sous-estime pas l'exactitude du modèle dans certains domaines de l'espace des solutions,**
- **en contexte imprécis, cette mesure est moins soumise aux indéterminations de l'arithmétique des intervalles que les autres.**

4 - III.2.5 Exactitude d'un modèle imprécis

Dans le cas d'un modèle imprécis, les valeurs des variables critères ne sont pas uniques, et dans notre cas sont représentées par des intervalles de valeurs. Nous étudions dans cette partie comment étendre la procédure d'estimation de l'exactitude au cas où le modèle à qualifier ou la référence fournissent des résultats en contexte imprécis. Ainsi, pour une variable x, on note : X l'intervalle de valeurs pour x, $\underline{x}$ et $\overline{x}$ respectivement, la borne inférieure et la borne supérieure de l'intervalle $X = \left[\underline{x}, \overline{x}\right]$. L'arithmétique des intervalles fournit pour les opérations élémentaires sur des variables représentées par des intervalles, la définition de l'intervalle résultant [Kearfott, 1996, Dessart, 2004].

La soustraction de deux intervalles est un intervalle et est définie de la manière suivante :

$$X - Y = \left[\underline{x}, \overline{x}\right] - \left[\underline{y}, \overline{y}\right] = \left[\underline{x} - \overline{y}, \overline{x} - \underline{y}\right]$$

On peut également définir la valeur absolue d'un intervalle :

$$\left|X\right| = \left|\left[\underline{x}, \overline{x}\right]\right| = \begin{cases} \left[min\left(\left|\underline{x}\right|, \left|\overline{x}\right|\right), max\left(\left|\underline{x}\right|, \left|\overline{x}\right|\right)\right] & si \quad 0 \notin X \\ \left[0, max\left(\left|\underline{x}\right|, \left|\overline{x}\right|\right)\right] & si \quad 0 \in X \end{cases}$$

On peut donc étendre la définition de la mesure d'exactitude au contexte imprécis et nous donnons une mesure de l'exactitude en contexte imprécis, pour une erreur absolue :

$$Ex = \max_i \left|\widetilde{X}_i - X_i\right|$$

où $\widetilde{X}_i$ est l'intervalle des valeurs d'une VCr du modèle à qualifier et X_i l'intervalle de valeurs d'une VCr de la référence en un point « i » de l'espace des solutions.

On peut noter que cette définition est également valable dans le cas où le modèle ou la référence sont « infiniment » précis (la valeur de la variable x est un réel x_0), l'intervalle de x est alors : $X = [x_0, x_0]$, la figure 4-4 présente deux exemples numériques simples.

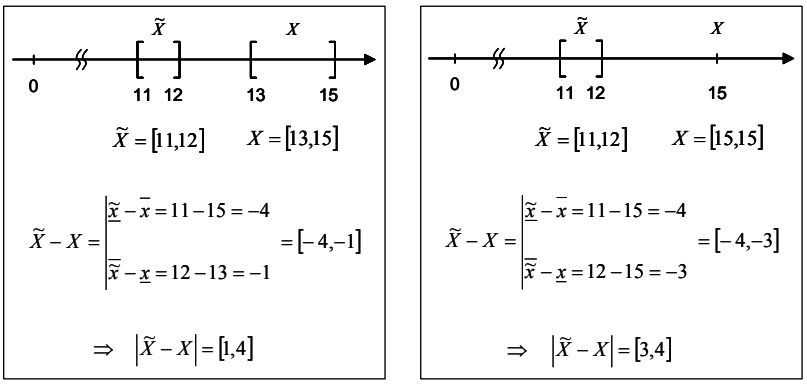


Figure 4-4 : Extension de la définition de l'erreur absolue en contexte imprécis grâce à l'arithmétique des intervalles, deux exemples numériques de mesures de l'erreur absolue

[Moore, 1966] donne une définition de la distance entre deux intervalles : $d(X,Y) = max\left(|\underline{x} - \underline{y}|, |\overline{x} - \overline{y}|\right)$. Cependant, cette définition est issue de la définition d'une norme sur l'ensemble des intervalles, le résultat d'une telle définition est donc un réel. Cette définition ne nous paraît pas satisfaisante pour une mesure de l'exactitude en contexte imprécis, puisqu'elle ne permet pas de conserver l'aspect intrinsèquement vague du modèle, il y a donc une perte d'information dans cette mesure. Ainsi, dans le cas où certaines valeurs des intervalles correspondent aux valeurs de la référence, la distance n'est pas nulle alors que le modèle est partiellement exact pour certaines valeurs. Nous illustrons cela par les deux exemples de la figure 4-5.

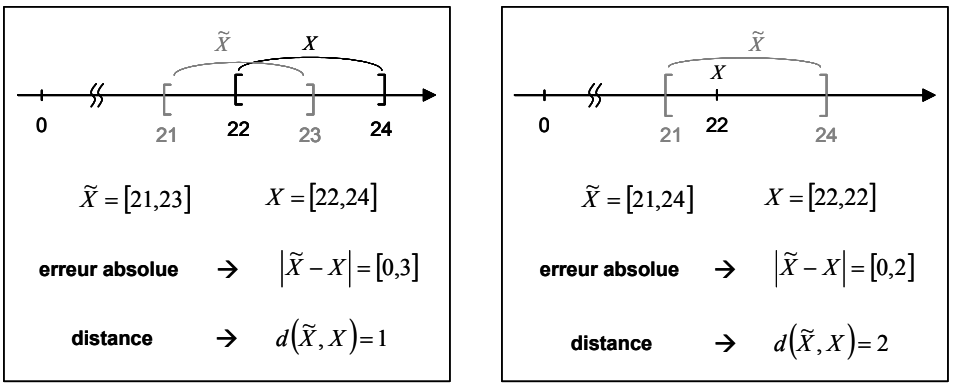


Figure 4-5 : Comparaison entre la distance de deux intervalles et une mesure de l'erreur absolue

La figure montre que dans le cas où le modèle est partiellement exact, la distance entre deux intervalles n'est pas nécessairement nulle. En revanche la définition que nous proposons permet de dire que le modèle est partiellement exact puisque l'erreur absolue peut prendre la valeur 0. Le modèle est donc exact à la précision de la mesure de l'exactitude près ; cette précision dépend de la précision du

modèle à qualifier et de la référence. La mesure de l'exactitude proposée permet de garder l'aspect imprécis et toute l'information, tous les écarts entre le modèle qualifié et la référence sont conservés. Enfin, si l'on souhaite faire une comparaison, il est nécessaire de proposer une mesure caractérisée par un réel. On peut alors prendre le milieu de l'intervalle de l'exactitude. Ceci permet de comparer les exactitudes d'un modèle précis et d'un modèle imprécis.

On peut évaluer l'exactitude d'un modèle en contexte imprécis, en conservant la même définition que la mesure en contexte précis, grâce à l'arithmétique des intervalles.

La mesure d'exactitude obtenue est un intervalle, elle permet de conserver l'aspect imprécis et toutes les valeurs d'exactitude du modèle imprécis.

4 - III.2.6 Procédure de qualification de l'exactitude

1. Définir une référence.
2. Définir les variables qui serviront de comparaison : (i) pour la référence, (ii) pour le modèle.
3. Définir les valeurs des variables d'entrée qui serviront de lieux de comparaisons : un point, ou plusieurs points d'évaluation.
4. Calculer l'exactitude pour chaque variable de comparaison.
5. Comparer à la valeur seuil ou objectif de l'exactitude.

4 - III.2.7 Critique

Nous avons défini une procédure d'estimation de l'exactitude d'un modèle. La qualité de cette évaluation dépend en grande partie du choix des variables de comparaison pour le modèle et la référence, ainsi que des points de comparaison. Il apparaît clairement qu'on ne peut réaliser qu'une estimation de cette exactitude, car les cas où les grandeurs de la référence et du modèle à qualifier seront identiques, sont rares En outre, l'estimation de l'exactitude du modèle sera souvent restreinte à une partie de l'espace de conception, par conséquent, le risque de conception sera maîtrisé pour les solutions trouvées dans cette partie de l'espace et il augmentera nécessairement quand les solutions trouvées s'éloigneront du domaine validé du modèle.

L'estimation proposée de l'exactitude présente l'avantage de constituer une mesure objective qui diffère de certaines techniques de validation présentées par [Balci, 1998], qui suggèrent, par exemple, de juger de l'exactitude d'un modèle sur la base des variations du modèle en fonction de certaines variables pour les comparer à des cinétiques ou à des valeurs de dérivées connues.

Nous estimons l'exactitude intrinsèque d'un modèle en considérant sur l'ensemble de son domaine d'application, le maximum de l'erreur faite sur la détermination des variables critères. L'erreur est calculée en comparaison avec les valeurs de ces variables critères issues d'un comportement de référence.

4 - III.3 Précision

4 - III.3.1 Précision, incertitude, imprécision : définitions

Les notions d'incertitude et d'imprécision sont liées et souvent confondues. Par exemple, [Law, 1996] définit ainsi l'imprécision : « l'incertitude qui résulte d'une information vague ou incomplète ».

On retrouve également des caractéristiques communes en examinant les différentes classifications des sources d'imprécision. Ainsi, Powell et Ribeiro [Powell et Ribeiro, 1999] discutent de la prise de décision en contexte incertain, mais il ne propose qu'une classification des sources d'imprécision. [Giachetti et al., 1997] classe les sources d'imprécision rencontrées au cours des problèmes de conception de la manière suivante :

- l'imprécision sur les relations (*Relationship imprecision*) : elle résulte de l'aspect ambigu des relations entre plusieurs variables,
- l'imprécision sur les données (*Data imprecision*), due à des paramètres dont la valeur n'est pas explicitement connue,
- l'imprécision linguistique (*Linguistic imprecision*) : qui émane d'une description qualitative des objectifs, des contraintes et des préférences des acteurs de la conception,
- l'imprécision due à des incohérences (*Inconsistency imprecision*) : elle résulte de conflits entre les objectifs souvent contradictoires qui peuvent intervenir dans différentes situations du cycle de vie ; ces contradictions peuvent alors imposer d'agrandir l'ensemble des valeurs sur certaines variables.

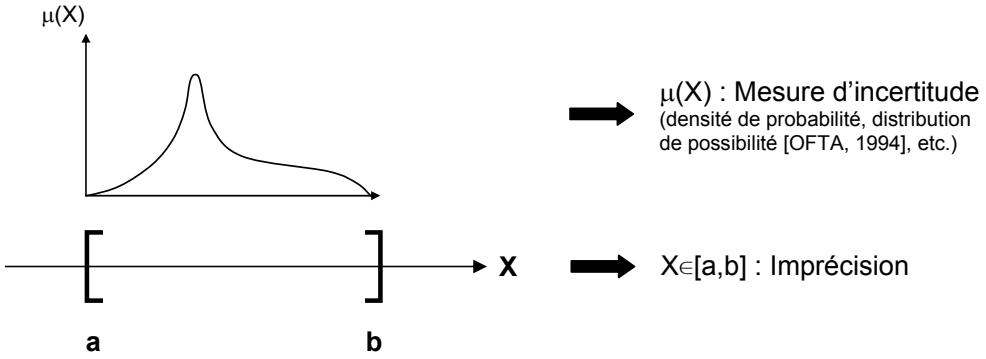
On s'aperçoit dans la classification proposée par [Giachetti et al., 1997], que certaines sources d'imprécisions, en particulier l'imprécision sur les données, sous-entendent aussi une forme d'incertitude. Antonsson et Otto [Antonsson et Otto, 1995] essaient de les distinguer. D'une part, ils affirment que l'incertitude est généralement utilisée pour traduire des variations stochastiques qui peuvent apparaître tout au long du processus de conception. D'autre part, ils définissent ainsi l'imprécision : « le terme imprécision est utilisé pour signifier l'incertitude liée au choix entre plusieurs alternatives. Une variable imprécise en conception préliminaire est une variable qui est susceptible de prendre n'importe quelle valeur dans un intervalle, car le concepteur ne connaît pas a priori la valeur qui résultera du processus de conception. ».

Nous définissons l'incertitude et l'imprécision de la manière suivante (figure 4-6) :

- l'imprécision est l'aspect vague ou flou lié à la distinction entre plusieurs valeurs d'une même variable, et qui se traduit par un ensemble de valeurs possibles pour la variable (par exemple, sous la forme d'un intervalle),
- l'incertitude est le niveau de confiance associé aux différentes valeurs possibles d'une même variable (par exemple, sous la forme d'une densité de probabilité).

L'incertitude, indépendamment de la représentation choisie, introduit donc une notion de gradualité [*sic*] dans l'imprécision [OFTA, 1994]. Enfin, nous définissons la précision, en faisant abstraction de l'origine ou de l'interprétation qui peut en être faite (imprécision, incertitude, etc.).

La précision est l'étendue du domaine des valeurs possibles d'une variable.



⇒ **Précision de la variable X : b-a**

Figure 4-6 : Distinction entre incertitude et imprécision

4 - III.3.2 Conception en contexte imprécis

Antonsson propose une méthode (*Method of Imprecision*) de choix de conception en contexte imprécis basé sur l'agrégation de préférences [Antonsson et Otto, 1995, Scott et Antonsson, 1998]. Les choix sont basés sur la définition de niveaux de préférences sur les valeurs des variables. Il fait également une revue des méthodes de conception en contexte imprécis (méthode de Taguchi, méthodes basées sur les intervalles, sur les ensembles flous, etc).

Il existe également des extensions au formalisme des PSC (CSP flexibles [Dubois et al., 1996, Schiex et al., 1997], etc.), qui permettent de prendre en compte les incertitudes dans les problèmes de satisfaction de contraintes.

Il existe donc différents cadres de travail d'aide à la décision en contexte imprécis ou incertain. Néanmoins, aucune des méthodes présentées ne permet de qualifier la précision intrinsèque des modèles. L'imprécision est prise en compte au niveau des connaissances par l'intermédiaire d'intervalles de valeurs pour les variables. Les valeurs des variables sont complétées de niveaux d'incertitude, de possibilité ou de préférence qui servent à ordonner les solutions. Le choix d'une solution est alors caractérisé par l'incertitude ou la préférence associée.

Il existe des travaux fournissant des outils d'aide à la décision en contexte imprécis, mais ils ne répondent pas au problème de modélisation et de caractérisation des modèles. En outre, ces travaux ne tiennent pas compte de l'inexactitude éventuelle des modèles.

Nous n'abordons donc pas les problèmes liés au traitement de l'incertitude, nous considérons la précision du modèle éventuellement liée à l'incertitude des variables, mais indépendamment du niveau de confiance que l'on peut accorder à chacune des valeurs de cette variable. Nous limitons notre travail à la qualification de la précision des modèles, car une incertitude peut toujours se traduire par une re-

présentation imprécise des données dans un modèle. En outre, le formalisme classique des PSC numériques prend en compte simplement les données imprécises par l'intermédiaire de l'algèbre des intervalles, alors que l'incertitude nécessite plus d'informations et un traitement plus complexe, du fait de la gradualité entre les valeurs possibles d'une variable.

Nous proposons au travers de notre démarche d'aider le concepteur à formaliser différents modèles d'un même système à partir de modèles connus. Ces modèles ont des qualités intrinsèques différentes vis-à-vis des objectifs de modélisation. Notre but est donc de faire un choix entre différents modèles, sachant qu'un modèle intrinsèquement précis sera plus approprié pour l'aide à la décision. Nous souhaitons pour notre part qualifier les modèles et caractériser leur précision intrinsèque.

4 - III.3.3 Sources d'imprécisions du modèle

La conception préliminaire est tributaire de différentes sources d'imprécisions comme nous l'avons vu précédemment. Si nous nous accordons avec la classification proposée par [Giachetti et al., 1997], nous distinguons cependant pour notre part deux types d'imprécisions :

- celles qui sont intrinsèques au modèle,
- celles qui sont attachées au problème de conception.

Ainsi, dans les phases préliminaires de la conception, les valeurs des dimensions du système à concevoir ainsi que certaines grandeurs extérieures au système (*e.g.* liées aux conditions de fonctionnement) sont connues de façon imprécise. De la même manière, indépendamment des spécifications techniques requises, les valeurs des variables critères sont connues de manière imprécise, car l'expérience du concepteur lui permet de prédire un ordre de grandeur de ces variables. Ces imprécisions sont totalement indépendantes des différents modèles susceptibles d'être formalisés afin de décrire le comportement du système. Elles sont liées aux informations fournies par le cahier des charges, qui sont à ce stade de la conception, mal définies.

L'imprécision intrinsèque à un modèle peut être liée quant à elle :

- à l'incertitude sur les valeurs de certaines variables qui apparaissent dans le modèle,
- à l'incertitude dans la définition d'une relation entre plusieurs variables.

Certains auteurs [Fargier et al., 1995, Otto et Antonsson, 1994, Bensana et al., 2000] s'accordent pour distinguer parmi les variables d'un PSC deux types de variables :

- les variables contrôlables : leur valeur est affectée sous le contrôle du concepteur,
- les variables incontrôlables : dont l'affectation échappe au contrôle direct du concepteur.

On voit apparaître clairement la distinction entre incertitude et imprécision : des variables peuvent être imprécises, puisque leurs valeurs en début de conception sont mal connues (le plus souvent les variables de conception et critères), mais certaines variables sont à la fois imprécises et incertaines (le plus souvent les variables intermédiaires). La précision intrinsèque d'un modèle est liée aux sources d'incertitudes des variables incontrôlables et aux relations entachées d'incertitude, nous l'estimons au travers de la précision des variables critères du modèle (*cf.* figure 4-7).

Le niveau de précision du modèle est influencé à la fois par l'imprécision des relations du modèle et par l'imprécision des variables incontrôlables.

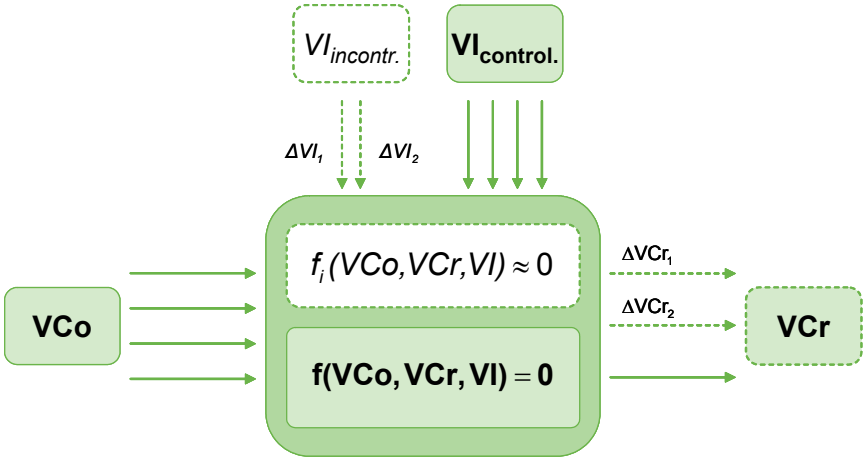


Figure 4-7 : Les variables incontrôlables (en pointillés) et les relations incertaines (en blanc) conditionnent le niveau de précision des variables critères et donc la précision intrinsèque du modèle

4 - III.3.4 Estimation de la précision intrinsèque du modèle

a. Définition d'une mesure

De la même manière que pour l'exactitude, la précision d'un modèle est attachée à certaines variables, pour lesquelles on souhaite avoir un degré de résolution suffisant pour pouvoir faire des choix de conception corrects. Ainsi, nous définissons la précision intrinsèque d'un modèle comme la fluctuation de la valeur des VCr. En outre, il est nécessaire de donner une direction privilégiée au modèle, puisque l'imprécision d'une relation ou d'une variable incontrôlable peut se propager a priori à n'importe quelle variable du modèle. Elle est estimée par la mesure de la taille du domaine de variation des VCr due à la propagation de l'imprécision des variables incontrôlables et des relations imprécises sur les valeurs des VCr. On peut donc proposer naturellement une mesure de l'imprécision sous la forme de la longueur de l'intervalle dans le cas où les VCr sont des variables continues ou le cardinal du domaine de variation des VCr, si ce sont des variables discrètes. On peut également suggérer une estimation de la précision relative en rapportant l'intervalle à une valeur du domaine de variation, par exemple, le milieu de l'intervalle.

b. Influence des autres variables

La précision du modèle va également dépendre des valeurs des autres variables par la propagation de l'imprécision d'une variable sur les autres. Comme pour l'exactitude, deux combinaisons de valeurs de VCo ne donneront pas systématiquement la même précision sur une VCr. Il est donc nécessaire d'évaluer l'influence des VCo afin de connaître au mieux la précision intrinsèque au modèle. La préci-

sion doit donc être prise en compte pour des domaines de variation donnés des autres variables, a priori pour l'ensemble de l'espace d'application du modèle. En pratique, on fixera les valeurs des variables contrôlables pour pouvoir distinguer la précision intrinsèque au modèle, de la précision des variables critères due aux variations des variables contrôlables. Pour des raisons de coût d'évaluation, la précision sera évaluée sur un nombre restreint de combinaisons de valeurs des variables contrôlables d'entrée. Comme pour l'estimation de l'exactitude, on fixera donc les variables d'entrée, et l'on évaluera, en chaque point de l'espace de conception choisi, la précision des VCr.

On évalue la précision intrinsèque d'un modèle à la précision des VCr.
On fixe les valeurs des variables contrôlables. Les variables d'entrée sont :

- **Les VCo et les VI contrôlables dont la valeur est fixée,**
- **Les valeurs des variables incontrôlables évoluant sur l'intervalle défini par l'imprécision associée à la variable.**

4 - III.3.5 Procédure de qualification de la précision

1. Identifier les sources d'imprécisions intrinsèques au modèle (variables incontrôlables, relations incertaines).
2. Définir les variables qui serviront de comparaison pour le modèle (choix des variables de sortie).
3. Définir les points de comparaison (choix des variables d'entrée).
4. Calculer la précision induite pour chaque variable de sortie.
5. Comparer à la valeur seuil ou objectif de la précision.

4 - III.3.6 Critique

La procédure que nous proposons permet de réaliser une estimation de la précision d'un modèle. Toutefois, la mesure que nous proposons n'est pas indépendante des points de comparaison choisis et la connaissance de la précision du modèle est limitée aux domaines de l'espace de conception couverts. On pourrait proposer d'autres mesures de précision qui ne soient pas assujetties aux valeurs des variables d'entrée. Par exemple, la taille des intervalles de variation des variables incontrôlables permet d'évaluer l'imprécision, mais d'une part, cette imprécision est uniquement liée à l'imprécision des données, et d'autre part, elle ne peut traduire la précision intrinsèque au modèle liée aux relations incertaines. La procédure proposée est un compromis entre la simplicité et la justesse de l'estimation de la précision intrinsèque au modèle.

Nous faisons le choix d'estimer la précision intrinsèque d'un modèle au travers de l'étendue du domaine des variables critères.

4 - IV SPÉCIALISATION

La spécialisation du modèle caractérise l'ensemble des hypothèses et des informations qui restreignent son champ d'application.

Nous avons montré au chapitre 2 que l'analyse fonctionnelle permet d'effectuer une décomposition du système. Par l'intermédiaire de l'organigramme technique et des blocs diagrammes fonctionnels, on réalise en réalité une première abstraction du système, et donc un premier modèle du système. Nous avons vu au chapitre 3, que lors de la descente dans les niveaux systémiques, dans le but d'exprimer un modèle de composant, cela avait systématiquement pour effet d'obliger à spécialiser ou à effectuer des choix d'alternatives de conception. Il existe donc un lien entre le niveau de détail d'un modèle, qui est lié aux niveaux systémiques des différents modèles de composants du système, et la spécialisation du modèle.

Ainsi, selon le niveau systémique auquel on se place, on spécialisera plus ou moins le modèle. En outre, nous avons montré lors de la formalisation du modèle du flux d'énergie thermique de la batterie, que si l'on souhaite adapter le modèle pour en augmenter sa parcimonie, on peut être amené à faire certaines hypothèses spécialisantes ou simplificatrices. Il existe donc, indépendamment de la spécialisation inhérente au niveau systémique de représentation du modèle, une spécialisation du modèle liée aux différentes hypothèses émises lors de la modélisation.

Nous proposons donc d'estimer la spécialisation d'un modèle au travers de deux types de connaissances liées au modèle :

- le plus bas niveau systémique utilisé pour la formalisation d'un modèle,
- les hypothèses de modélisation les plus restrictives du modèle.

Il est difficile de proposer une estimation de la spécialisation d'un modèle qui soit non subjective et satisfaisante. C'est pourquoi, nous proposons une procédure d'évaluation qui est cohérente avec le reste de notre travail. Nous ne pensons pas qu'il serait judicieux de proposer une estimation numérique de la spécialisation d'un modèle, qui risquerait d'être incorrecte.

Cependant, l'appréciation proposée n'évite pas certains écueils, notamment, chaque modèle du modèle global associé à un flux fonctionnel peut présenter des niveaux systémiques de représentation différents (comme c'est le cas par exemple pour le modèle de la batterie). En outre, dans certains cas, on ne pourra pas juger deux modèles trop différents l'un de l'autre.

Par conséquent, l'estimation proposée de la spécialisation des modèles n'est qu'une appréciation subjective et qualitative du niveau de spécialisation des modèles, qui servira éventuellement à départager des modèles dont les niveaux de parcimonie, d'exactitude et de précision sont équivalents.

Nous estimons la spécialisation d'un modèle au travers des principales hypothèses restreignant son domaine d'application et du plus bas niveau systémique utilisé pour sa formalisation.

4 - V LIENS ENTRE LES QUATRE PARAMÈTRES

Selon nous, il n'est pas pertinent de comparer différents modèles entre eux en se basant sur un seul des paramètres suivants : exactitude, parcimonie, précision, ou spécialisation. Nous souhaitons montrer dans cette section que, pour un modèle donné, ces 4 paramètres sont complètement liés. Nous donnons des pistes de réflexion sur la manière dont évoluent les 4 paramètres du PEPS d'un modèle lorsqu'on cherche à en modifier un, parce que le modèle n'est pas assez parcimonieux, pas assez exact, pas assez précis ou trop spécialisé pour l'utilisation qu'on souhaite en faire.

Afin de montrer les liens qui existent entre ces quatre paramètres caractéristiques d'un modèle, nous tentons de montrer comment ils peuvent évoluer dans un espace où les quatre dimensions sont : la parcimonie, l'exactitude, la précision et la spécialisation d'un modèle. Cet espace sera appelé espace de décision ou espace décisionnel. Un modèle qu'on aura qualifié en terme de PEPS sera représenté comme un point dans cet espace.

4 - V.1 Exploitation d'un modèle

Comme nous l'avons expliqué au chapitre 2, au moment de la modélisation, on cherche à formaliser un modèle du système dont le PEPS soit un compromis acceptable entre les différents paramètres. L'idéal, en conception préliminaire, est de pouvoir appuyer les choix de conception sur un modèle qui soit :

- très parcimonieux, pour pouvoir résoudre le modèle le plus facilement possible,
- très exact, afin que les choix réalisés soient cohérents avec la réalité observée,
- très précis, afin de pouvoir choisir,
- très peu spécialisé, pour pouvoir couvrir à l'aide du modèle l'ensemble de l'espace de conception.

On définit le domaine d'exploitation d'un problème – par opposition au domaine intrinsèque au problème – comme le domaine de l'espace décisionnel pour lequel les valeurs des paramètres du PEPS d'un modèle sont cohérentes avec les objectifs de la modélisation. Ainsi, un modèle dont le PEPS appartient à ce domaine est un modèle suffisamment parcimonieux, exact, précis et peu spécialisé pour être exploité en conception préliminaire, conformément aux objectifs fixés. Ce domaine contient donc le point de parcimonie, exactitude et précision infinies et de spécialisation nulle. Ce point est représenté par le point B dans la figure 4-8 illustrant la forme de ce domaine restreint aux paramètres de parcimonie, d'exactitude et de précision.

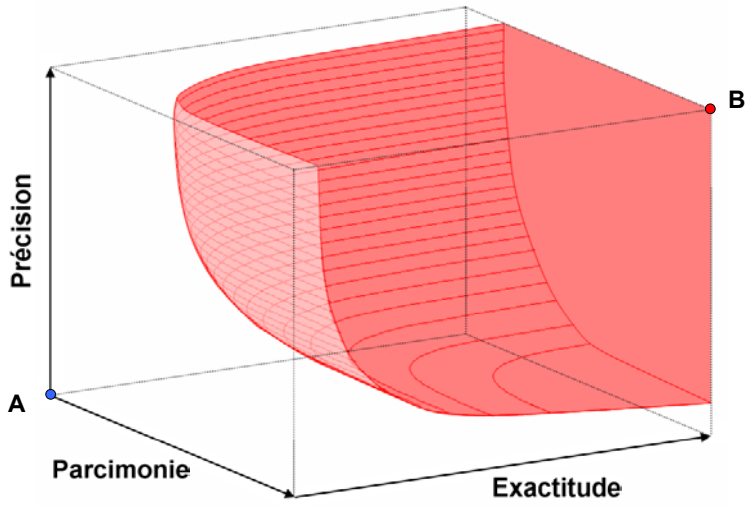


Figure 4-8 : Illustration du domaine d'exploitation d'un problème

Le domaine d'exploitation du problème ne contient aucun des points dont l'un des paramètres – parmi la parcimonie, l'exactitude ou la précision – est nul, ni les points de spécialisation infinie, étant donné que :

- un modèle très peu parcimonieux ne peut être résolu,
- un modèle inexact ne permet pas de faire de choix cohérents avec le comportement réel observé,
- un modèle imprécis traduit des connaissances trop vagues pour aider à la décision,
- un modèle trop spécialisé ne fait que décrire le comportement d'un système déjà défini.

En outre, le domaine d'exploitation du problème ne contient pas le point de spécialisation infinie et de parcimonie, d'exactitude et de précision nulles, pour les mêmes raisons. On a représenté ce point de l'espace des quatre paramètres du PEPS par le point A dans la figure 4-8.

Le domaine d'exploitation d'un problème de conception définit l'espace dans lequel le PEPS d'un modèle peut évoluer en restant cohérent avec les objectifs de modélisation et avec le traitement du modèle.

4 - V.2 Domaine d'évolution du PEPS, intrinsèque au problème

Pour un problème de conception préliminaire donné, il est possible de proposer plusieurs modèles formalisés du comportement du système comme on l'a vu dans le chapitre précédent. Chaque modèle est repérable dans l'espace de décision par un point caractéristique de son PEPS. L'ensemble de ces points forme un domaine de l'espace de décision lié au problème, nous le nommons domaine intrinsèque au problème de conception. Afin de caractériser le domaine intrinsèque au problème de conception, nous proposons d'observer le comportement asymptotique des liens entre les 4 paramètres au travers du tableau 4-2 : on observe les caractéristiques du modèle lorsqu'un des paramètres prend une valeur extrême.

Tableau 4-2 : Comportement asymptotique des paramètres du PEPS des modèles

Parcimonie	Exactitude	Précision	Spécialisation	Interprétation
Infinie	***Nulle***	-	-	Un modèle très parcimonieux traduit un comportement réel avec une faible exactitude
Infinie	-	***Nulle***	-	Un modèle très parcimonieux doit être faiblement précis pour traduire un comportement réel
Infinie	-	-	***Infinie***	Un modèle très parcimonieux traduit un comportement très spécialisé
Nulle	***Infinie***	-	-	Un modèle très exact doit être peu parcimonieux pour traduire un comportement réel
-	***Infinie***	***Nulle***	-	Un modèle très exact doit être peu précis pour traduire un comportement réel
-	***Infinie***	-	***Infinie***	Un modèle très exact traduit un comportement très spécialisé
Nulle	-	***Infinie***	-	Un modèle très précis doit être peu parcimonieux pour traduire un comportement réel
-	***Nulle***	***Infinie***	-	Un modèle très précis traduit un comportement réel avec une faible exactitude
-	-	***Infinie***	***Infinie***	Un modèle très précis traduit un comportement très spécialisé
Nulle	-	-	***Nulle***	Un modèle peu spécialisé traduit de manière peu parcimonieuse un comportement réel
-	***Nulle***	-	***Nulle***	Un modèle peu spécialisé traduit de manière peu exacte un comportement réel
-	-	***Nulle***	***Nulle***	Un modèle peu spécialisé traduit de manière peu précise un comportement réel

Il existe donc, selon nous, des points du domaine d'évolution du PEPS pour lesquels l'amélioration d'un paramètre entraîne nécessairement la dégradation d'un des trois autres. Ces points constituent la frontière du domaine, et cette frontière tend à se rapprocher des axes lorsqu'au moins un des paramètres devient très grand. Ce domaine exclut donc le point B de parcimonie, exactitude et précision infinie et de spécialisation nulle. De plus, ce domaine contient le point A, puisqu'on peut aisément formaliser un modèle – qui ne présente évidemment aucune utilité – inexact, imprécis, peu parcimonieux et très spécialisé. La figure 4-9 illustre le champ d'évolution du PEPS dans le domaine intrinsèque du problème pour un espace restreint à trois dimensions de l'espace de décision.

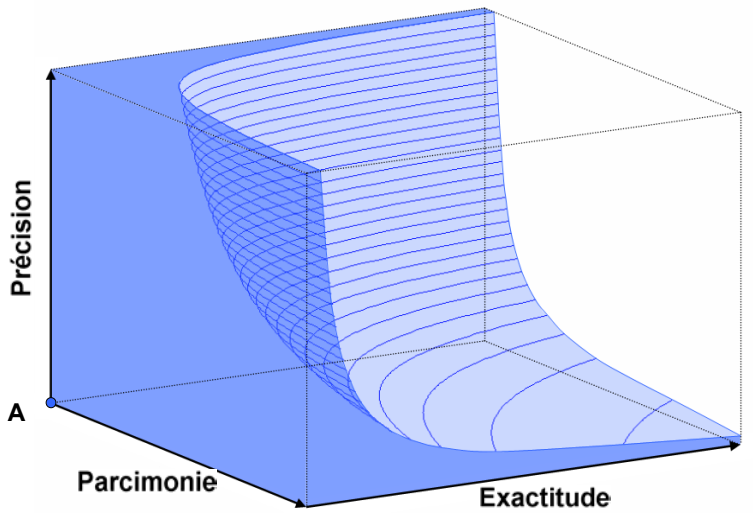


Figure 4-9 : Domaine d'évolution de 3 paramètres du PEPS, domaine intrinsèque au problème

4 - V.3 Lien entre le domaine d'exploitation et le domaine intrinsèque

La figure 4-10 est donnée à titre d'illustration afin de montrer que pour un problème donné, le fait de trouver un modèle dont les quatre paramètres de PEPS sont conformes aux objectifs est difficile. En effet, l'espace qui résulte de l'intersection du domaine d'évolution du PEPS intrinsèque au problème et le domaine d'évolution du PEPS pour lequel l'exploitation du modèle est conforme aux objectifs est confiné à certains domaines de parcimonie, d'exactitude, de précision et de spécialisation. Il se peut également qu'en pratique cette « intersection » soit vide, et qu'on ne puisse pas exploiter un modèle ou définir un modèle exploitable dans le cadre d'une démarche de conception préliminaire.

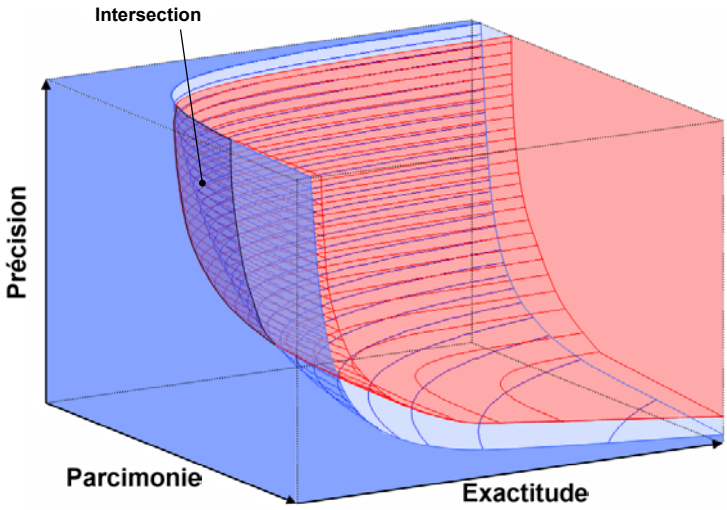


Figure 4-10 : Positionnement des deux domaines l'un par rapport à l'autre

Le domaine d'évolution du PEPS intrinsèque à un problème est limité : on ne peut pas améliorer indéfiniment un paramètre du PEPS sans en dégrader un autre.

Il peut donc s'avérer difficile pour un problème donné de faire évoluer un modèle de sorte que son PEPS soit cohérent avec son exploitation et les objectifs de modélisation.

4 - VI CONCLUSION

4 - VI.1 Estimation du PEPS d'un modèle

Ce chapitre a permis de montrer que le PEPS est une caractéristique intrinsèque à chaque modèle. Il fournit un critère d'appréciation de la qualité des modèles par rapport aux objectifs de la modélisation en conception préliminaire. Cependant, nous avons vu qu'il est difficile de proposer des procédures d'estimation qui soient à la fois satisfaisantes et générales. Cela peut s'expliquer de la manière suivante : l'estimation du PEPS d'un modèle peut être vu comme **un modèle de qualification**. On suppose que seuls ces 4 paramètres permettent de caractériser un modèle. Comme nous l'avons montré précédemment, il n'est pas possible d'obtenir un modèle à la fois extrêmement exact, précis, parcimonieux et général. On ne peut donc pas, de notre point de vue, proposer de **modèle de mesure** du PEPS qui soit à la fois très exact, précis, parcimonieux et général.

Ceci explique que les procédures que nous avons proposées ne sont que des estimations. On sait par expérience que le fait d'estimer une erreur en plusieurs points de l'espace de conception ne permet pas de conclure de manière certaine sur l'exactitude du modèle en dehors de ces points. En outre, afin de proposer des mesures du PEPS qui soient cohérentes, nous avons spécialisé ces mesures aux cas des modèles formalisés à l'aide de relations algébriques et analytiques. Ces estimations ne sont donc pas systématiquement valables dans d'autres contextes de modélisation, mais sont valides dans le cas des modèles que nous traitons. Nous montrons au chapitre 5 un exemple de qualification de modèles de la batterie.

4 - VI.2 Adaptation d'un modèle

Nous avons observé dans ce chapitre que chaque modification réalisée sur un modèle a une influence sur le PEPS du modèle. Inversement, le modèle d'un système peut être adapté en modifiant les caractéristiques intrinsèques du modèle. En outre, nous avons montré qu'il est impossible d'adapter indéfiniment le modèle d'un système afin d'améliorer l'un des 4 paramètres, sans dégrader au moins l'un des trois autres.

L'adaptation d'un modèle consiste à faire évoluer les paramètres de son PEPS. L'objectif est alors de trouver un modèle qui soit un compromis entre chacun des paramètres, en vue de faire progresser le PEPS du modèle vers des zones du domaine intrinsèque qui soient acceptables pour son exploitation.

Les résultats présentés dans cette section doivent être complétés par l'étude et l'explication plus complètes de ces mécanismes, qui constituent des perspectives de recherche afin d'améliorer les possibilités pour guider le concepteur dans la démarche d'adaptation des modèles.

CHAPITRE 5

QUALIFICATION de MODÈLES ADAPTÉS de la BATTERIE

OBJECTIFS :

Ce chapitre présente un exemple de l'estimation du PEPS pour deux modèles de comportement de la batterie. L'outil de traitement que nous utilisons est Constraint Explorer (CE), le solveur de problèmes de satisfaction de contraintes numériques développé par Dassault Aviation. Il nous sert également d'outil de calcul pour estimer les paramètres du PEPS des modèles.

5 - I PRÉSENTATION DES MODÈLES

Nous avons montré, dans le chapitre 3, que la démarche permet de formaliser plusieurs modèles du système de refroidissement de la batterie associés au flux d'énergie thermique (FET). Ces modèles sont de niveaux systémiques différents et leur capacité à produire une aide à la décision en conception préliminaire diffère compte tenu de leurs caractéristiques intrinsèques. La figure 5-1 rappelle les différents niveaux étudiés, ainsi que les composants impliqués à chaque niveau. Pour chacun, la possibilité de retenir un modèle de composant a été étudiée. Afin d'illustrer la démarche, seul le modèle de niveau 5 a été développé au chapitre 3. Les autres modèles ont été écartés parce qu'ils ne font pas apparaître la variable critère associée au FET, ou pour des raisons liées à l'estimation du PEPS des modèles. Le modèle formalisé au niveau 5 a été retenu parce qu'il fait apparaître la température au cœur du faisceau. Il a cependant été adapté dans le but d'améliorer sa parcimonie : une première fois en réalisant une homogénéisation, puis en faisant des hypothèses spécialisantes et simplificatrices (*cf.* chapitre 3, § II.3).

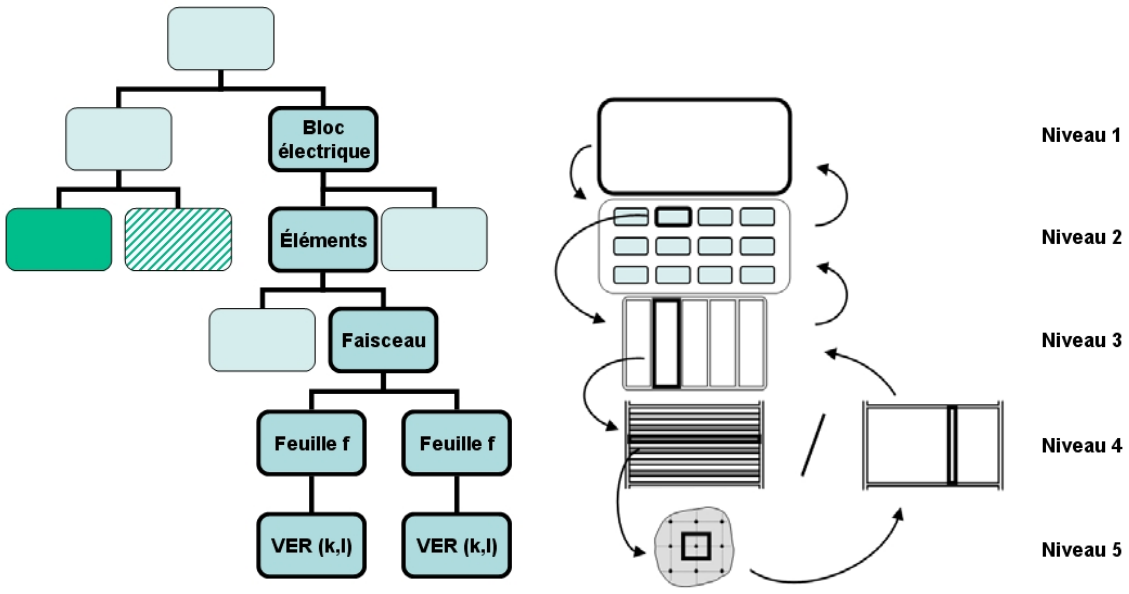


Figure 5-1 : Étapes successives de la formalisation du modèle du flux d'énergie thermique de la batterie, récapitulation des niveaux systémiques considérés

5 - I.1 Description du modèle adapté du niveau 5

Parmi les modèles de batterie présentés, nous choisissons donc de retenir celui dans lequel le FET est décrit à partir de modèles de composants et d'interaction de niveau 5 (*cf.* chapitre 3, § II.3). Il fait intervenir des variables de conception des faisceaux (géométrie, matériaux). Il s'agit ici de qualifier ce modèle, que nous appellerons par la suite modèle adapté du niveau 5.

5 - I.2 Description du modèle adapté du niveau 2

Afin d'illustrer la démarche de qualification, nous retenons également un modèle écarté dans un premier temps. Ce modèle, de niveau 2 (*cf.* chapitre 3, § II.3), fait intervenir un modèle de composant des éléments, où la température est considérée comme uniforme (*cf.* figure 5-1). L'interaction avec l'air est modélisée à l'aide de la théorie des nombres d'unités de transfert. Comme pour le modèle précédent, le modèle de niveau 2 est adapté au niveau 1, en faisant l'hypothèse que la température de l'air est la même quelque soit l'alignement.

5 - I.3 Description du modèle de référence (MR)

La référence choisie pour qualifier l'exactitude des deux modèles formalisés est un modèle de calcul numérique formalisé par un code de simulation basé sur la méthode des volumes finis. Ce modèle est résolu au moyen du logiciel de calcul Matlab®. Ce modèle constitue une référence du fait qu'il a permis de valider la possibilité de refroidir ce type de batteries par ventilation. Le choix de conception retenu pour le système de ventilation – issu de ce modèle – s'est porté sur un ventilateur, qui a été ensuite validé par retour d'expériences. Nous présentons brièvement ce modèle.

Le modèle de référence (MR) modélise le comportement thermoaéraulique du bloc de la batterie. Le modèle d'abstraction est le même, c'est-à-dire que l'alternative de conception dont on modélise le comportement est la même que celle étudiée dans le chapitre 3. Le MR est basé sur la même décomposition fonctionnelle : alignements d'éléments parallélépipédiques contenant plusieurs faisceaux également parallélépipédiques. Le volume élémentaire représentatif pour le MR est défini ainsi :

- pour l'équilibre thermique des éléments de la batterie, le volume élémentaire est un faisceau.
- pour l'équilibre thermique de l'air, un volume de mêmes largeur et hauteur qu'un faisceau et d'épaisseur égale à l'espace entre deux alignements.

Le MR est donc moins spécialisé que le modèle de niveau 5, puisque le volume élémentaire représentatif choisi pour écrire les équations fait apparaître un niveau de détail équivalent à un niveau systémique 4. Les variables de conception (VCo) liées aux faisceaux sont limitées aux dimensions extérieures, le MR n'a pas de variables liées aux épaisseurs ou aux matériaux des feuilles constituant les faisceaux.

Il fait intervenir en amont et en aval du bloc des éléments d'interface (conduites) permettant d'acheminer le flux de circulation d'air de l'extérieur vers la batterie, puis de la batterie vers l'extérieur.

Ces éléments peuvent être définis parmi des coudes, des tubes droits ou des changements de section et interviennent dans le calcul de l'équilibre aéraulique. On peut également faire intervenir un filtre, mais le composant du ventilateur n'intervient pas de manière explicite dans le modèle.

Les paramètres d'entrée du modèle sont :

- la géométrie du bloc : nombres d'éléments dans la largeur, dans la longueur, dans la hauteur, nombre de faisceaux par éléments, dimensions des éléments et des faisceaux,
- les propriétés thermiques du bloc : conductivités longitudinale et transversale des faisceaux, puissance thermique de chauffe des faisceaux, conductivité du matériau des boîtiers,
- l'écart de température de l'air entre l'entrée et la sortie qui impose une consigne de débit global (qui serait le débit du ventilateur),
- les caractéristiques des éléments d'interface pour le flux de circulation d'air.

Le MR permet de déterminer les champs de température de l'air et des faisceaux, les débits et les pertes de charge dans le bloc, ainsi que la masse de poussières se déposant sur les surfaces d'échange dans le bloc au bout de mille heures de fonctionnement. Leur détermination se fait par itérations. Un premier calcul permet de déterminer les débits et les pertes de charge dans le réseau défini, puis à partir de la connaissance des débits et pertes de charge, les températures dans le bloc sont déterminées. Ce calcul est réitéré plusieurs fois jusqu'à la convergence globale pour une précision de calcul donnée (*cf.* figure 5-2).

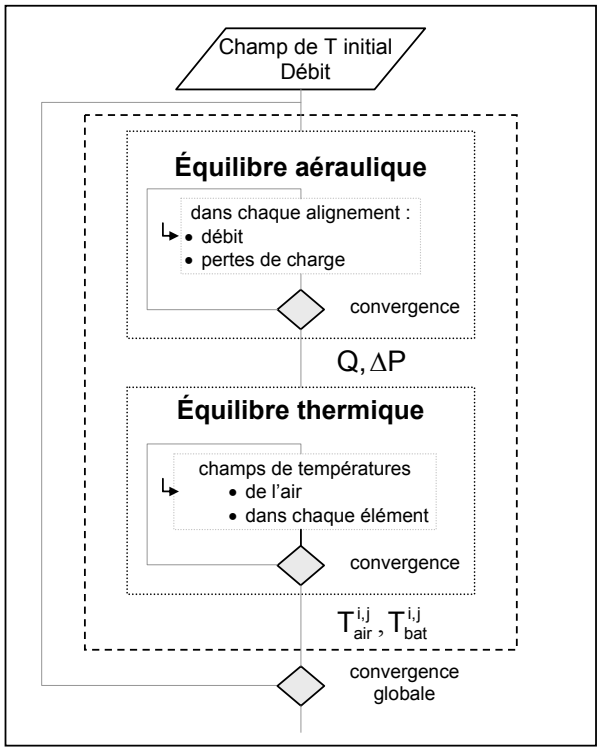


Figure 5-2 : Organigramme présentant l'algorithme de résolution du modèle de référence

5 - I.3.1 Équilibre aéraulique

Le système formé par les équations de conservation de la masse d'air et par l'équilibre des pressions d'air dans le circuit de refroidissement est non-linéaire. Il ne peut être résolu dans le cas général que par des méthodes itératives. Nous utilisons pour le résoudre un vecteur $\{X\}_k$, caractéristique de la k^{ème} itération, qui intègre les valeurs des débits massiques dans chaque liaison. Le calcul de $\{X\}_k$ se fait en linéarisant le système formé par les équations de conservation de la masse d'air et par l'équilibre des pressions dans le circuit de refroidissement dans chaque liaison.

Le calcul de $\{X\}_k$ à chaque itération *k* se fait en résolvant un système linéaire qui intègre une matrice APC et un vecteur BPC tels que : $APC \cdot \{X\}_k + BPC = 0.$

La matrice APC et le vecteur BPC sont calculés à chaque itération et sont définis par le système d'équations formé par les équations de conservation de la masse d'air et par l'équilibre des pressions dans le circuit de refroidissement. La taille de la matrice APC étant assez faible, le calcul de $\{X\}_k$ à chaque itération se fait en inversant la matrice APC : $\{X\}_k = -APC^{-1} \cdot BPC'.$

Le calcul du vecteur des débits massiques dans les différentes liaisons découle directement du calcul itératif du vecteur $\{X\}_k$. Les pertes de charges sont calculées dans chaque liaison à l'aide de corrélations issues de [Idelc'ik, 1986].

5 - I.3.2 Équilibre thermique

Le modèle numérique permet de calculer le champ de température pour l'air et dans les faisceaux en tout point du bloc. Le calcul des températures de l'air et des faisceaux dans la batterie découle du modèle qui est précisé dans le paragraphe suivant et qui nous a conduit à exprimer ces températures comme la solution d'un système linéaire d'équations : $A \cdot X + B = 0$. X est le vecteur qui permet de déterminer les températures de l'air et les températures moyennes des faisceaux dans chaque volume de contrôle.

Les matrices A et B sont définies par les équations suivantes :

- équations de conservation de l'énergie dans l'air,
- équations de l'équilibre thermique des faisceaux.

Les équations de conservation de l'énergie dans l'air sont stockées dans les premières lignes des matrices A et B. Elles prennent en compte le transport convectif de chaleur ainsi que les échanges convectifs avec les parois des faisceaux. Les débits et les pertes de charge calculés précédemment sont utilisés dans ces équations afin de déterminer les coefficients d'échange, en utilisant une analogie de Colburn.

Les équations d'équilibre thermique des faisceaux sont stockées dans les dernières lignes des matrices A et B. Elles prennent en compte le transport conductif de chaleur dans le faisceau, ainsi qu'un équilibre thermique moyen entre le faisceau et ses proches voisins.

Lorsque le vecteur *X* a été calculé, on peut déterminer la température en tout point de la batterie, pour l'air dans chaque volume de contrôle, pour les faisceaux en déduisant de la température moyenne dans chaque faisceau une distribution de la température (*cf.* figure 5-3).

5 - II VALIDATION POUR LE TRAITEMENT DES MODÈLES ADAPTÉS

Constraint Explorer (CE) permet le traitement de modèles exprimés par des relations algébriques et analytiques. Les variables que l'algorithme de résolution peut traiter peuvent être des variables réelles, des variables entières et des variables symboliques (comme des noms de matériaux ou des références de catalogue par exemple). En outre, CE permet l'utilisation d'opérateurs logiques afin de combiner des relations entre elles pour obtenir des méta-relations. Les opérateurs logiques opèrent sur une ou plusieurs relations algébriques comme des égalités ou des inégalités (notées <rel1>, <rel2>) :

- (NON) <rel1>,
- <rel1> (ET) <rel2>,
- <rel1> (OU) <rel2>,
- et un opérateur du type (SI) <rel1> (ALORS) <rel2> appelé « déclencheur » [1].

Ainsi, les deux modèles formalisés que nous avons retenus sont bien adaptés à l'outil de traitement que nous nous proposons d'utiliser, puisque les différentes équations sont des relations algébriques. De même, les diverses corrélations permettant de déterminer les coefficients d'échange et de perte de charge peuvent être utilisées dans un modèle cohérent avec la syntaxe des modèles traités par CE à l'aide de l'opérateur « déclencheur ».

Chaque modèle est formalisé et écrit dans une syntaxe cohérente avec CE et détaillé en annexe 4.

5 - III QUALIFICATION DES MODÈLES : ESTIMATION DU PEPS

5 - III.1 Parcimonie

Dans le cadre de notre démarche, les modèles formalisés font intervenir uniquement des relations du type algébrique ou analytique entre variables. Nous évaluons donc la parcimonie des modèles formalisés en prenant simplement en compte le nombre de variables et de relations des modèles.

Le modèle adapté du niveau 2 fait intervenir :

- 37 variables dont 15 VCo et 3 VCr,
- 28 relations.

La parcimonie du modèle de niveau 2 est donc de **1/65**.

[1] Cet opérateur diffère de l'implication mathématique : lorsque une contrainte " R1 ⇒ R2" est vraie la contraposée n'est pas vraie avec l'opérateur déclencheur.

Le modèle adapté du niveau 5 fait intervenir :

- 50 variables dont 29 VCo et 3 VCr,
- 28 relations.

La parcimonie du modèle de niveau 5 est donc de **1/78**.

Le modèle de niveau 5 est donc moins parcimonieux que le modèle de niveau 2, mais il fait intervenir plus de VCo.

5 - III.2 Spécialisation

Le modèle adapté du niveau 2 est le plus général, car le plus bas niveau systémique considéré pour formaliser les relations associées au FET est le niveau 2. On n'a donc fait aucun choix de concept de solution qui fasse intervenir de composants de niveaux inférieurs aux éléments du bloc. Ainsi, les éléments sont en quelque sorte des « boîtes noires » : ils sont caractérisés uniquement par leurs dimensions et le modèle ne fait pas intervenir de VCo de matériaux ou de dimensions internes aux éléments. Par exemple, le modèle formalisé ne définit pas de concept de solution pour les cellules dans les éléments : elles peuvent être parallélépipédiques, comme pour le modèle adapté du niveau 5, ou cylindriques.

Pour formaliser le modèle de niveau 5, nous sommes descendus au niveau systémique faisant intervenir les VCo des faisceaux. Ce modèle est donc plus spécialisé que le modèle de niveau 2.

En ce qui concerne la spécialisation des modèles inhérente aux hypothèses de modélisation, les hypothèses émises sont identiques pour les deux modèles. Les hypothèses principales sont :

- l'écoulement d'air est unidimensionnel et la température est la même le long de l'écoulement quelque soit l'alignement (l'influence des effets de bords est négligée pour la température dans les alignements aux extrêmités),
- les coefficients d'échange sont considérés comme moyens sur la longueur d'échange,
- l'enceinte du bloc est considérée comme calorifugée.

Pour les autres flux fonctionnels, les modèles sont de même niveau de spécialisation, puisque ce sont les mêmes modèles d'interaction qui sont utilisés (*cf.* chapitre 3).

5 - III.3 Précision

Les modèles qualifiés sont ceux dont la syntaxe est présentée en annexe 4. Ils ne font intervenir aucune imprécision intrinsèque. Toutes les relations sont écrites sans faire apparaître d'imprécision. Ce sont des égalités, et les variables des deux modèles sont toutes considérées comme contrôlables. Ainsi, les différentes sources d'incertitude des modèles sont ignorées.

Par conséquent, les modèles de niveau 2 et de niveau 5 tels qu'ils sont présentés, sont intrinsèquement « infiniment » précis. Les modèles sont ensuite traités numériquement. Le calcul introduit une imprécision, les solutions sont donc précises à la précision du calcul près.

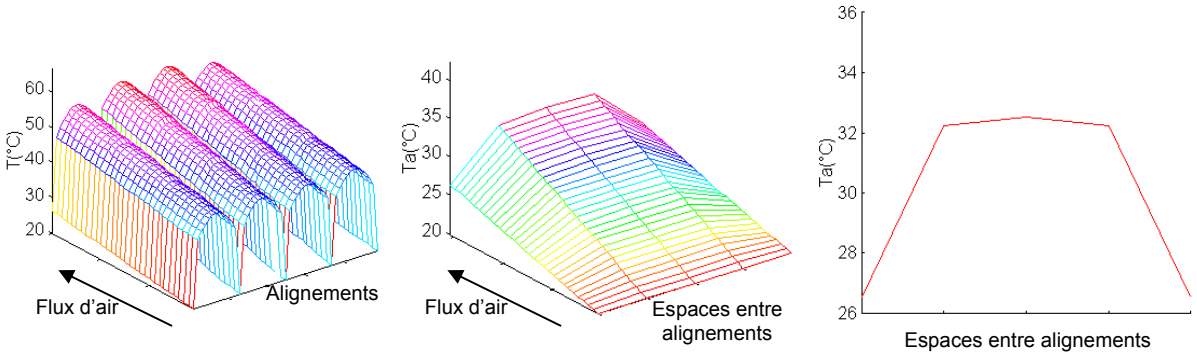
5 - III.4 Exactitude

5 - III.4.1 Stratégie de qualification : choix des variables et des points de comparaison

a. Choix des variables de comparaison

Par souci de simplicité dans l'illustration de la démarche de qualification, nous n'avons implémenté que les modèles d'interaction et de composants associés au flux d'énergie thermique et au flux d'énergie mécanique de circulation d'air pour chaque modèle. Le choix des variables de comparaison est lié conjointement aux deux modèles et au modèle de référence (MR).

Ainsi, pour le flux d'énergie thermique, les variables de comparaison sont les variables critères de niveau 0 qui lui sont associées : la température maximale dans le bloc électrique de la batterie et l'écart de température maximal dans le bloc. Pour chaque simulation (figure 5-3), les résultats fournis par le MR sont : un champ discret de températures pour l'air et pour les faisceaux, la température de l'air en sortie et l'écart maximal de température à cœur. Les variables de sortie du MR diffèrent des VCr des modèles à qualifier et nécessitent donc un traitement avant d'être comparées.



(a) Température dans les éléments du bloc **(b) Température de l'air entre les alignements** **(c) Température de l'air en sortie du bloc**

Figure 5-3 : Champs de températures calculés à l'aide du modèle de référence

La température maximale est déterminée sur l'ensemble des températures dans les faisceaux, c'est donc une température locale. L'écart maximal de température dans le bloc qu'on doit considérer est l'écart entre les températures maximales de chaque faisceau, on cherche donc à déterminer l'écart de température entre le faisceau dont la température à cœur est maximale et le faisceau dont la température à cœur est minimale. La détermination de l'écart maximal de température donné par le MR nécessite un traitement des résultats, puisque les températures dans les faisceaux tiennent compte des effets de bord (l'air qui longe les alignements aux extrémités du bloc est moins chauffé que l'air au centre du bloc), le maximum de température dans un faisceau n'est pas nécessairement au milieu du faisceau. L'écart maximal est entre le maximum de température des faisceaux des alignements du centre et la température maximale des faisceaux à l'entrée de la batterie des alignements du bord du bloc (*cf.* figure 5-4).

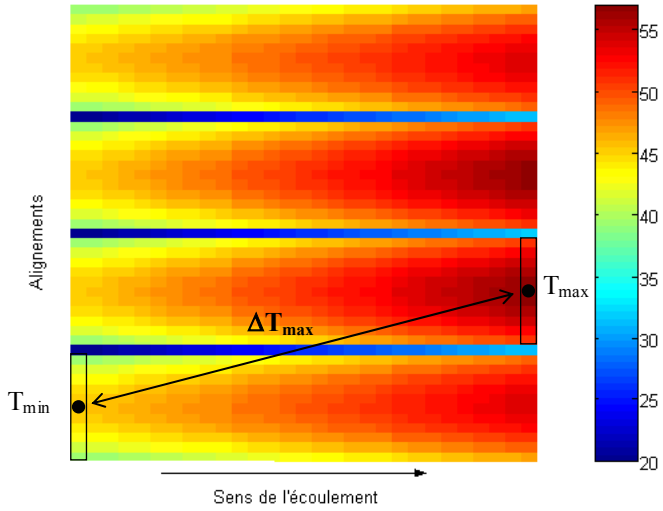


Figure 5-4 : Écart maximal de température dans le bloc pour le modèle de référence

Pour la température de sortie de l'air, les modèles que nous avons formalisés font intervenir une température moyenne de sortie. Afin de comparer les modèles, nous calculons une température de mélange d'air à partir des températures d'air en sortie de chaque espace entre alignement et de la connaissance des débits.

Pour le flux d'énergie mécanique de circulation de l'air, le MR ne fait pas intervenir explicitement de modèle de composant pour le ventilateur. La variable critère choisie pour qualifier l'exactitude du modèle est donc une variable commune aux trois modèles : les pertes de charge dans le bloc de la batterie.

Enfin, nous évaluons l'erreur faite par les 2 modèles sur le calcul de la température de l'air en sortie du bloc. Cette grandeur n'était pas donnée explicitement comme une variable critère par le cahier des charges, mais nous verrons par la suite qu'il est intéressant d'estimer l'erreur commise par les modèles sur cette variable intermédiaire afin d'identifier l'origine des inexactitudes.

Les variables de comparaison pour estimer l'exactitude des deux modèles à qualifier sont donc :

- la température maximale dans la batterie,
- l'écart maximal de température dans la batterie,
- les pertes de charge dans le bloc,
- la température de sortie de l'air.

b. Choix des points de comparaison : première méthode d'évaluation de l'exactitude

Le code de simulation du modèle et la syntaxe du logiciel Matlab® ne permettent pas de prendre en compte simplement l'ensemble des variables de conception telles que nous les avons mises en évidence pour les modèles formalisés grâce à notre démarche. Par conséquent, dans un premier temps, pour qualifier chacun des modèles adaptés, nous évaluons seulement leur exactitude pour une configuration donnée du système. La configuration étudiée a été choisie en fonction de la structure du MR. Pour cette

configuration, nous faisons varier le débit d'air dans le bloc, car c'est le principal facteur d'influence sur le comportement thermique de la batterie avec la géométrie, qui est fixée dans ce cas. Cela signifie que nous avons retiré les modèles de composant des différents ventilateurs des modèles de niveau 2 et 5. Les valeurs du débit sont choisies de telle manière que l'on fait varier l'écart de température de l'air entre l'entrée et la sortie parmi les valeurs suivantes pour le MR :

$$\Delta T_{air} \in \{5,6,7,8,9,10,12,14,16,18,20\}\ (K).$$

La configuration est déterminée comme suit. Nous avons porté sur la figure 5-5 quelques uns des éléments caractéristiques de celle-ci. Le bloc électrique de la batterie fait intervenir quatre alignements de trois éléments. Chaque élément contient 10 faisceaux.

Le modèle de référence ne fait pas intervenir les variables de conception associées à la géométrie d'un faisceau de manière explicite (nombres, épaisseurs, matériaux des électrodes, du séparateur et de l'électrolyte), mais les conductivités d'un faisceau sont des paramètres du MR. Afin de pouvoir comparer le modèle de niveau 5 avec la référence, il est nécessaire de fixer également les variables de conception associées aux faisceaux, à savoir la géométrie ainsi que les matériaux. Puis la conductivité équivalente des faisceaux issue du modèle de niveau 5 a été donnée comme paramètre pour la conductivité longitudinale dans le MR. Le modèle de niveau 2 ne demande pas de fixer la géométrie des faisceaux.

La puissance de chauffe des éléments a été fixée et correspond à un fonctionnement nominal de la batterie en cycle de décharge. La température de l'air en entrée du bloc est fixée. Toutes les autres variables non fixées sont déduites des valeurs des variables d'entrée par le calcul.

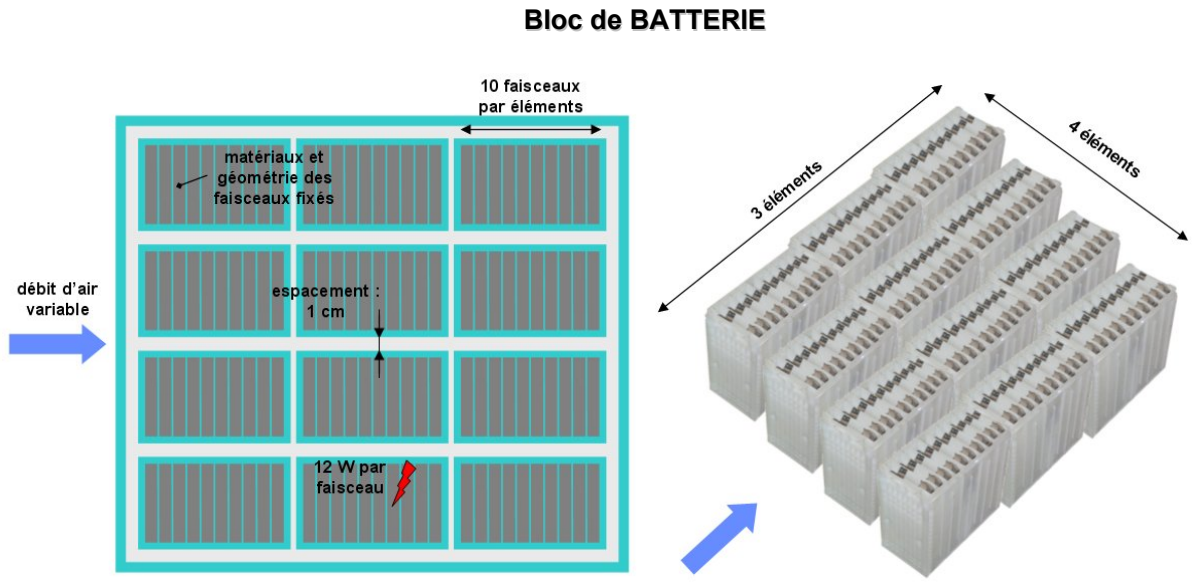


Figure 5-5 : Principales caractéristiques de la configuration étudiée

c. Choix des points de comparaison : seconde méthode d'évaluation de l'exactitude

Nous avons également effectué une analyse de sensibilité de l'exactitude des deux modèles aux variations de la géométrie du bloc. Nous n'avons retenu que trois variables pour mesurer l'influence des VCo sur l'exactitude des modèles. Cela signifie que les valeurs des autres variables d'entrée sont définies par les valeurs données pour la configuration à géométrie fixée présentée précédemment, et le débit est fixé. Le choix s'est porté sur les nombres d'éléments en largeur et en longueur dans le bloc, ainsi que sur l'espacement entre les alignements. Ce choix est lié aux hypothèses de modélisation qui ont été faites lors de la formalisation des modèles. Les principales hypothèses simplificatrices faites étaient essentiellement liées à la circulation de l'air (effets de bords négligés), nous avons donc choisi de nous limiter aux principales variables de conception qui permettent d'évaluer l'erreur faite compte tenu de ces hypothèses. L'analyse de sensibilité a été réalisée au travers d'un plan d'expérience : le choix s'est porté sur un plan factoriel complet à trois facteurs (2^3), car ce type de plan est simple à mettre en œuvre et que leur interprétation est directe par l'intermédiaire du calcul des effets et des interactions des facteurs (*cf.* figure 5-6 et tableau 5-1).

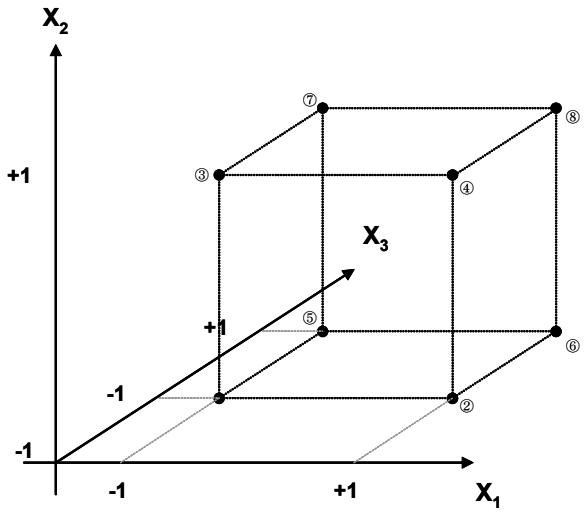


Figure 5-6 : Domaine expérimental du plan d'expérience factoriel complet à trois facteurs et deux niveaux

Les niveaux des facteurs ont été définis par les valeurs extrêmes de l'espace de conception pour chacune des variables, ce qui signifie que dans le cadre d'une résolution du problème de conception à l'aide de ces modèles de la batterie, les valeurs des trois variables sont toutes comprises dans le domaine d'étude (figure 5-6).

Tableau 5-1 : Facteurs et niveaux du plan d'expérience

Facteurs	Niveau -1	Niveau +1
X_1 : Nombre d'éléments en largeur	3	6
X_2 : Nombre d'éléments en longueur	3	6
X_3 : Espacement entre alignements	0,01 m	0,02 m

d. Mesure de l'exactitude

Nous utilisons comme mesure de l'exactitude le maximum des erreurs relatives signées pour chaque variable, sur l'ensemble des points de l'espace de conception considérés.

Nous nous fixons comme valeur seuil de l'exactitude :

- 5% pour les VCr associées au flux d'énergie thermique (température maximale et écart de température maximal dans le bloc),
- 10% pour la VCR associée au flux de circulation d'air (pertes de charge).

Ces niveaux sont nécessairement liés à la connaissance du système et sont donc déterminés par expérience des spécifications techniques du besoin.

5 - III.4.2 Qualification de l'exactitude

a. Méthode de calcul

Chaque combinaison des valeurs des variables d'entrée définit un point de comparaison. Pour chaque point de comparaison, une simple propagation des valeurs à l'aide de Constraint Explorer permet de déduire les valeurs de toutes les autres variables.

Il faut noter qu'un calcul – *i.e.* à géométrie fixée et pour un débit donné – n'est pas à proprement parler une solution de conception, étant donné que les modèles implémentés sous CE ne font intervenir que des modèles de comportement du système et ne prennent pas en compte d'autres contraintes de conception (*e.g.* le coût, les contraintes de fabrication, etc.). En revanche, il s'agit d'un point de fonctionnement possible pour le système pour une géométrie donnée.

b. Qualification à géométrie fixée et débit variable

Le modèle de niveau 5 permet de déterminer les valeurs des variables critères pour le flux d'énergie thermique avec des erreurs relatives qui sont acceptables avec le niveau d'exactitude souhaité pour la configuration étudiée (*cf.* figure 5-7). L'erreur sur T_{max} ne dépasse pas 2,5% sur le domaine de l'espace de conception étudié et diminue avec le débit ; quant à l'erreur sur ΔT_{max}, elle reste inférieure à 3% quelque soit le débit. Les erreurs sur les pertes de charge et la température de l'air restent également dans des intervalles acceptables. On remarque que l'erreur sur $T_{air,sort}$ suit de près en valeur et en variation la courbe de l'erreur de T_{max}. Cela signifie que l'échange entre l'air et le faisceau est modélisé relativement correctement – par rapport à la référence – et que la détermination de la température de l'air induit l'erreur sur T_{max}. L'erreur sur la température de l'air trouve sa justification par l'hypothèse de symétrie que nous avons faite en négligeant les effets de bord pour l'air circulant entre l'enceinte et les alignements aux extrémités. Ceci explique également le fait que cette erreur diminue quand le débit augmente, puisque cela a pour effet de diminuer l'écart entre les débits de chaque alignement. Pour le

domaine étudié le modèle adapté du niveau 5 est suffisamment exact, puisque les maxima des erreurs restent inférieurs aux valeurs seuil fixées.

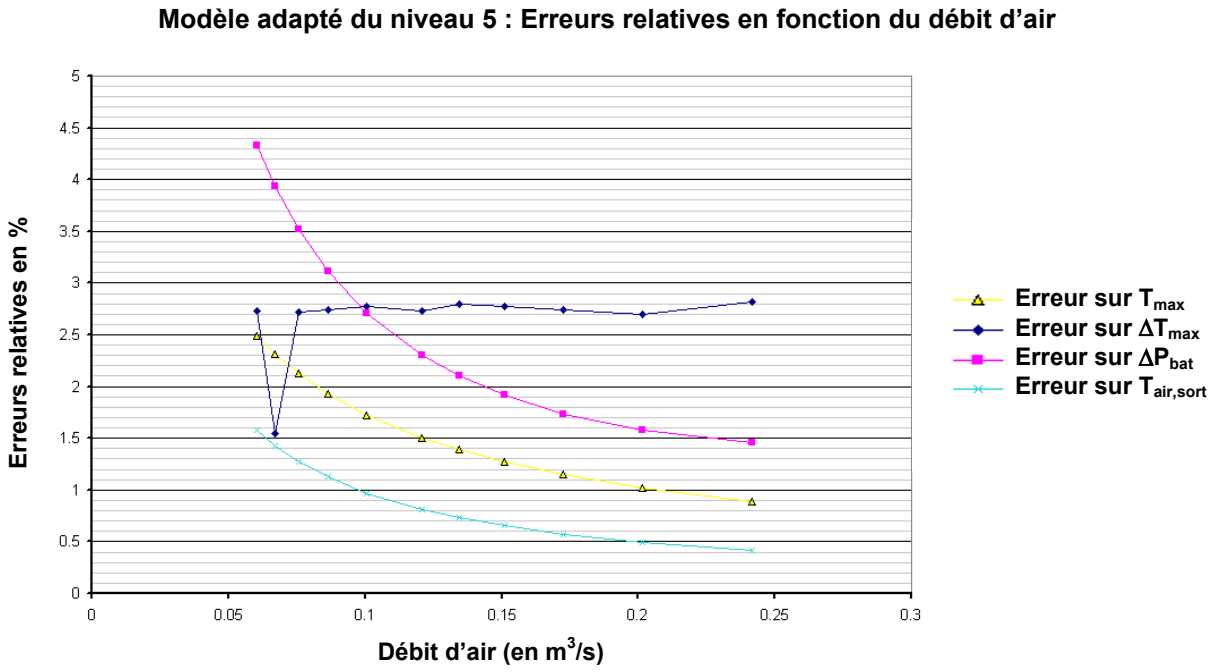


Figure 5-7 : Exactitude pour le modèle adapté de niveau 5 en fonction du débit d'air

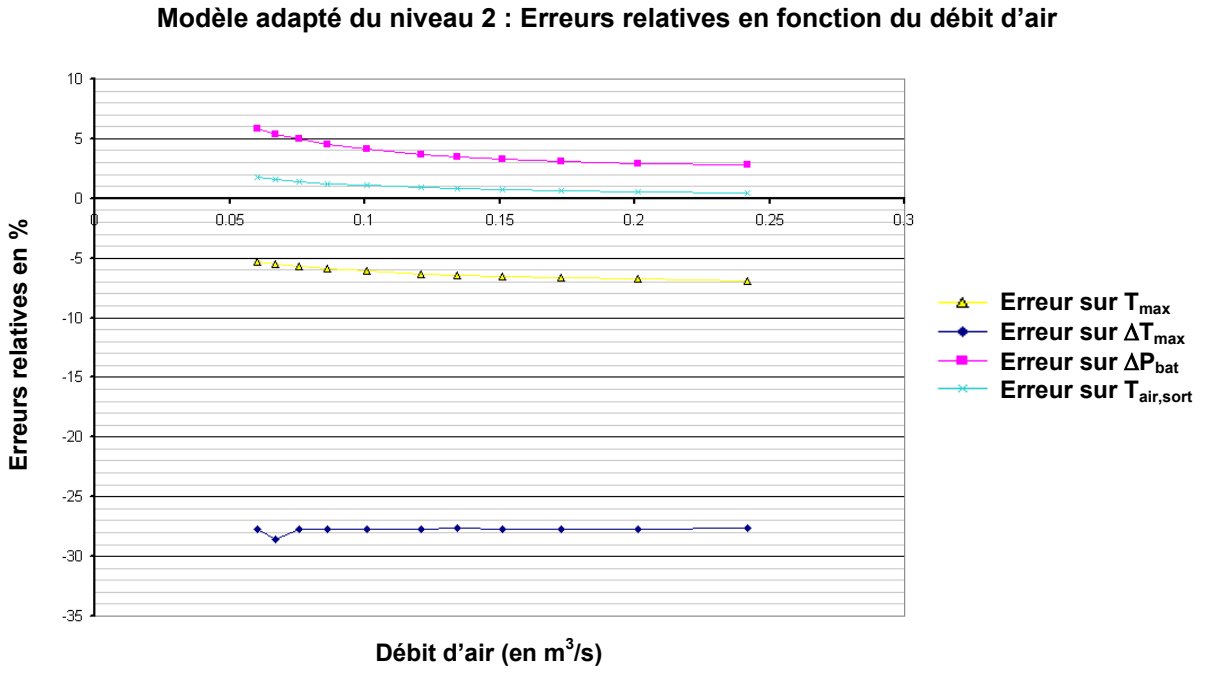


Figure 5-8 : Exactitude pour le modèle adapté de niveau 2 en fonction du débit d'air

La constatation principale que l'on peut faire pour le modèle de niveau 2 est que l'exactitude de ce modèle diffère de celle du modèle de niveau 5 essentiellement pour les variables critères associées au flux d'énergie thermique. Les erreurs pour la température de l'air et les pertes de charge sont légèrement supérieures mais restent dans les mêmes ordres de grandeur quelque soit le débit. Le signe de l'erreur relative pour T_{max} et ΔT_{max} permet de voir, comme on pouvait s'y attendre, que la variable critère utilisée pour le modèle de niveau 2 sous-évalue largement la valeur donnée par la référence pour T_{max}. Ceci est évidemment dû au fait que la variable critère utilisée est une moyenne de la température dans le dernier élément ventilé par l'air. Cela met en évidence une exactitude insuffisante pour le modèle de composant de l'élément qui consiste à considérer la température uniforme. En revanche, le fait que l'erreur sur la température de l'air soit proche de celle du modèle de niveau 5 montre que le modèle de niveau 2 pourrait être amélioré en proposant un modèle de composant plus exact pour l'élément. La mesure de l'exactitude retenue implique que le modèle adapté de niveau 2 possède un niveau d'exactitude insuffisant compte tenu des objectifs fixés. Nous étudions dans la section 5 - IV la possibilité d'adapter ce modèle aux objectifs liés au modèle, en vue d'améliorer son exactitude.

c. Qualification à géométrie fixée et débit variable

L'analyse de sensibilité, grâce au plan d'expérience mené, conduit à évaluer au travers des huit points du domaine étudié : la moyenne (a_0) des erreurs pour chaque variable de comparaison retenue des deux modèles, ainsi que les effets (a_1, a_2, a_3) de chaque facteurs et les interactions d'ordre 2 (a_{12}, a_{13}, a_{23}) et d'ordre 3 (a_{123}) entre facteurs. En premier lieu, on peut observer, en étudiant les valeurs moyennes et les valeurs des erreurs pour chaque point d'étude, que sur le domaine de l'espace de conception étudié, on retrouve globalement les mêmes niveaux d'exactitude pour les deux modèles. Ainsi, le niveau d'exactitude du modèle adapté du niveau 5 reste en accord avec l'objectif fixé, puisque le maximum reste inférieur à la valeur seuil pour les VCr du FET et pour les pertes de charge, et l'exactitude du modèle de niveau 2 est insuffisante.

Pour l'explication des effets, il est nécessaire de porter une attention particulière à l'interprétation des signes puisque la mesure de l'exactitude que nous avons utilisée est une erreur signée. Ceci signifie que lorsqu'un effet a_i est positif, l'erreur relative signée augmente : si l'erreur est négative, cela signifie que le modèle est plus correct lorsqu'on augmente le facteur i puisque l'erreur se rapproche de 0 ; a contrario, si l'erreur est positive, elle s'éloigne de 0 et l'exactitude diminue donc lorsque le facteur i augmente. Enfin, un effet de 1, signifie pour le facteur associé qu'une variation du facteur du niveau -1 au niveau +1 entraîne une variation de 1% pour l'erreur relative.

L'interaction entre le premier et le troisième facteur et l'interaction du second ordre n'ont pas d'influence sur l'exactitude des modèles. En revanche, les facteurs et les interactions entre le deuxième facteur et les deux autres sont non négligeables. Pour le calcul des pertes de charge, les deux premiers facteurs ont tendance à augmenter l'erreur. Pour la température maximale, le premier facteur et le troisième facteur diminuent l'exactitude du modèle.

Enfin, l'erreur faite sur la détermination de l'écart de température maximal dans le bloc a tendance à se réduire quand chacun des facteurs augmente, indépendamment ou simultanément.

Ainsi, on constate que l'exactitude du modèle de niveau 5 a tendance à diminuer pour les pertes de charge et la température maximale, avec deux des facteurs et à augmenter quelque soit le facteur pour l'écart de température maximal. En revanche, l'exactitude sur la température de l'air en sortie du bloc reste peu influencée par le premier et le troisième facteur l'exactitude. On peut donc en conclure que les facteurs ont globalement une influence non négligeable sur l'exactitude des deux modèles, et qu'il est nécessaire de veiller aux valeurs de ces variables afin de valider les résultats.

Tableau 5-2 : Synthèse des erreurs relatives (en %) pour chaque point du plan d'expérience, calcul des effets et des interactions des facteurs

unités : %		Modèle de niveau 5				Modèle de niveau 2			
		ΔP_bat	T_max	Tair_sort	ΔT_max	ΔP_bat	T_max	Tair_sort	ΔT_max
"Points expérimentaux"	"y_1"	1,54	0,95	0,55	3,49	2,91	-6,85	0,60	-27,17
	"y_2"	2,07	1,39	0,54	1,60	3,46	-6,42	0,62	-28,50
	"y_3"	2,73	0,98	1,09	3,11	4,42	-6,62	1,18	-10,83
	"y_4"	3,95	1,29	1,04	0,09	5,70	-6,18	1,20	-13,44
	"y_5"	1,36	2,35	0,55	2,50	2,43	-5,46	0,60	-27,87
	"y_6"	2,00	3,51	0,54	0,15	3,10	-4,34	0,62	-29,52
	"y_7"	2,53	2,33	1,09	2,07	3,97	-5,29	1,18	-11,74
	"y_8"	3,86	3,27	1,04	-1,42	5,36	-4,23	1,20	-14,75
Effets et interactions	a_0	2,50	2,01	0,81	1,45	3,92	-5,67	0,90	-20,48
	a_1	0,46	0,36	-0,01	-1,34	0,49	0,38	0,01	-1,08
	a_2	0,76	-0,04	0,26	-0,48	0,95	0,09	0,29	7,79
	a_3	-0,07	0,86	0,00	-0,62	-0,20	0,84	0,00	-0,49
	a_{12}	0,17	-0,04	-0,01	-0,28	0,18	-0,01	0,00	-0,33
	a_{13}	0,03	0,17	0,00	-0,12	0,03	0,16	0,00	-0,09
	a_{23}	0,00	-0,02	0,00	-0,01	0,01	-0,02	0,00	-0,06
	a_{123}	0,00	-0,01	0,00	0,00	0,00	-0,01	0,00	-0,01

Une des faiblesses de cette estimation de l'exactitude vient du fait que le plan choisi n'évalue l'influence de chaque facteur qu'en deux points du domaine expérimental, tout en faisant l'hypothèse qu'elle varie linéairement entre ces deux points. Cependant, ni les modèles qualifiés, ni le MR ne sont fortement non-linéaires et donc, a priori l'exactitude ne varie pas brusquement entre deux niveaux des facteurs. En outre, les niveaux des facteurs, qui délimitent le domaine expérimental (*cf.* figure 5-6), ont été choisis pour chacune des variables, aux extrémités du domaine de conception, c'est-à-dire qu'au moment de la résolution, la recherche ne s'effectuerait pas en dehors des domaines étudiés, on peut donc estimer, qu'en considérant le maximum de l'erreur sur l'ensemble des points, on a validé l'exactitude des modèles sur ce domaine, en dehors il y aura un risque de conception si le choix est fait avec ce modèle. Le critère que nous avons retenu permet tout de même de conclure que le modèle de niveau 5 est suffisamment exact pour le niveau fixé dans les limites fixées du domaine.

5 - III.4.3 Discussion à propos du choix des variables d'entrée

Le MR utilise comme paramètre d'entrée l'écart de température de l'air entre l'entrée et la sortie pour en déduire un débit d'air. À chaque valeur de ΔT_{air}, correspond donc une valeur du débit. Dans un

premier temps, pour estimer l'exactitude des deux modèles, nous avons choisi de fixer (entre autres) la valeur du débit dans chaque modèle et d'en déduire les valeurs pour les autres variables, dont les trois VCr définies et la température de l'air en sortie (*cf.* §5 - III.4.2b). La figure 5-9 et la figure 5-10 montrent l'estimation des erreurs relatives pour les mêmes points de comparaison qu'au § 5 - III.4.2b mais en utilisant l'écart de température de l'air comme variable d'entrée pour les modèles à qualifier.

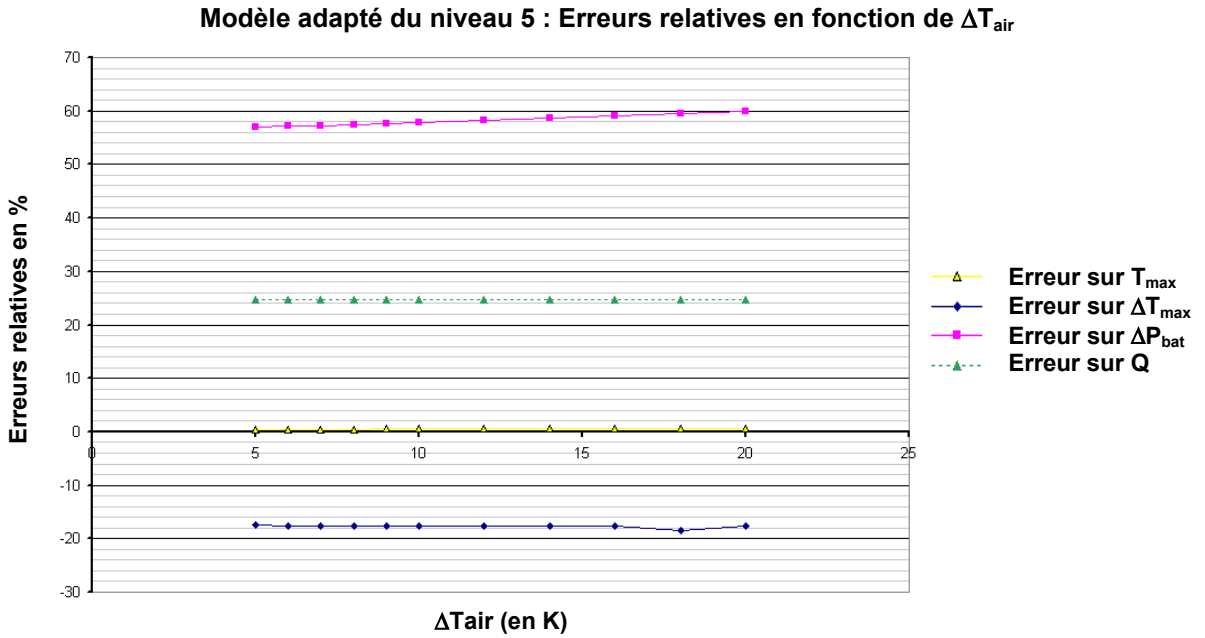


Figure 5-9 : Exactitude pour le modèle adapté de niveau 5 en fonction de l'écart de température d'air

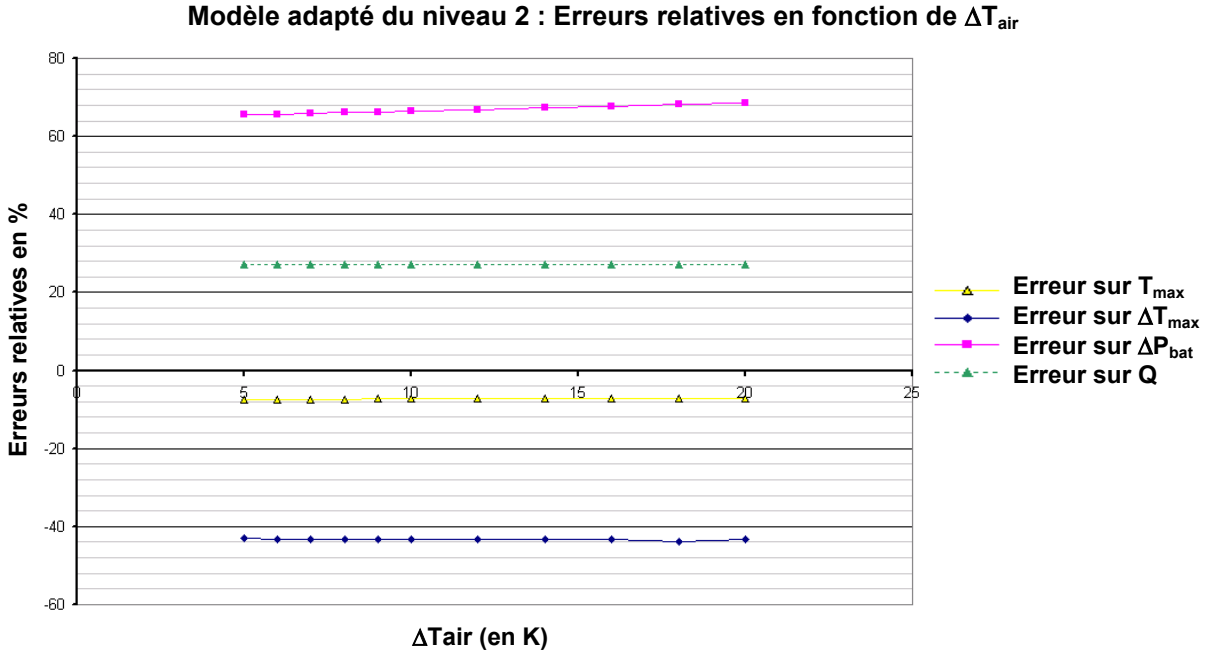


Figure 5-10 : Exactitude pour le modèle adapté de niveau 2 en fonction de l'écart de température d'air

On constate que les niveaux d'exactitude des deux modèles diffèrent complètement des estimations faites précédemment. En effet, hormis la température maximale, dont l'exactitude reste similaire, les erreurs faites sur les valeurs du débit, des pertes de charge ainsi que de l'écart de température maxi-

mal dans le bloc, ont augmenté significativement : dans les deux cas, l'erreur sur le débit est de l'ordre de 25%, celle sur les pertes de charge est de l'ordre de 60% et elle est de 20% et 40% pour l'écart maximal de température. On peut expliquer en partie cet accroissement de l'erreur pour les pertes de charges : du fait qu'elles varient non-linéairement en fonction du débit, une faible variation du débit entraîne de grandes variations sur les pertes de charge. On s'aperçoit donc dans ce cas, que l'erreur faite sur le calcul du débit s'est également propagée aux valeurs d'autres variables et particulièrement aux pertes de charge. Ceci tend à montrer l'importance des liens de causalité entre variables notamment pour la propagation des valeurs et des erreurs pour les variables intermédiaires. Ainsi, la qualification de l'exactitude d'un modèle est dépendante de la manière dont on cherche à réaliser cette estimation, notamment le choix des variables d'entrée et des variables dont la valeur sera déduite influe sur la propagation des erreurs, puis sur les résultats des valeurs des VCr et finalement sur l'exactitude. On peut également noter que la forme des équations du modèle influence la propagation de l'erreur. Ainsi, on montre sur la figure 5-11, comment les pertes de charge évoluent qualitativement avec le débit d'air dans le cas des modèles étudiés. On s'aperçoit que la forme de la relation, ainsi que l'ordre d'instanciation des variables influencent largement l'estimation de l'exactitude. La figure montre que les différences d'estimation peuvent devenir importantes si la valeur des pertes de charge est issue de celle du débit, plutôt que si l'on déduit la valeur du débit des pertes de charge. Cette erreur peut ensuite se propager à la détermination d'autres variables, ce qui explique la différence dans l'estimation de l'exactitude des deux modèles en fonction du débit ou en fonction de l'écart de température de l'air.

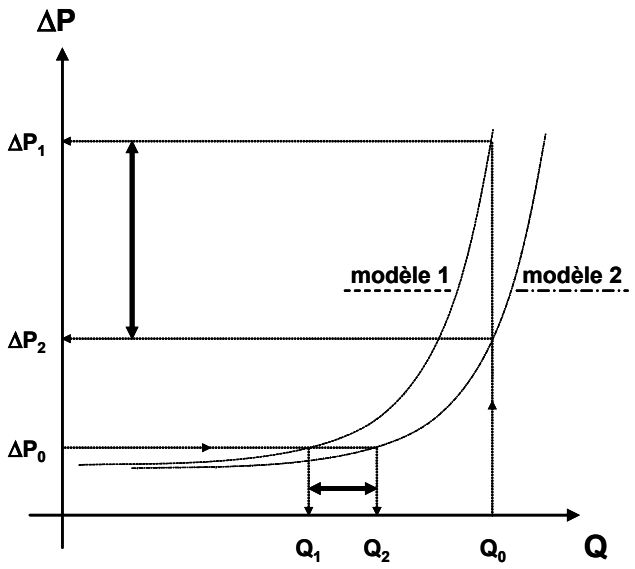


Figure 5-11 : Influence de l'ordre d'instanciation et de la forme des relations sur l'exactitude

Le choix des variables d'entrées est donc important dans la qualité de l'estimation de l'exactitude du modèle, par conséquent, une attention particulière doit être accordée à ce choix.

En outre, une des caractéristiques des calculs par propagation de contraintes réside dans le fait que le modèle ne fait pas intervenir de liens d'antériorité entre variables, c'est-à-dire qu'il n'y a pas de variables d'entrée, ni de variables de sortie. On peut donc trouver des solutions au modèle en imposant

comme valeurs en entrée n'importe laquelle des variables. Par exemple, il serait possible à l'aide de CE de déterminer l'ensemble des géométries du système conduisant à une température maximale fixée. En pratique, lors de la recherche de solutions, il est nécessaire de déterminer quelles variables sont déduites des valeurs des autres. On définit un ordonnancement des variables qui déterminera les relations de cause à effet ou d'antériorité entre les variables pendant le calcul.

Cette section montre que le choix de l'ordonnancement des variables est incontestablement primordial sur la qualité des résultats obtenus lors d'une résolution par propagation par contraintes. On s'aperçoit par conséquent qu'il peut être contre-productif de ne pas tenir compte de l'exactitude d'un modèle. L'engouement pour les techniques de propagation par contraintes est notamment lié à la possibilité de traiter des problèmes dont le cahier des charges est imprécis. Cependant, l'utilisation du calcul par contraintes en conception ne doit pas occulter le fait qu'il ne compense pas l'inexactitude intrinsèque à tout modèle.

5 - IV ADAPTATION DU MODÈLE DE NIVEAU 2

On souhaite améliorer l'exactitude du modèle de niveau 2 en tenant compte du fait que ce modèle est moins spécialisé et plus parcimonieux que le modèle adapté du niveau 5. On souhaite donc proposer une adaptation de ce modèle qui permettrait de conserver sa parcimonie et son niveau de spécialisation tout en augmentant son exactitude. Une des adaptations possibles, dans ce cas, est d'utiliser un modèle du type modèle « métier », lié à une bonne connaissance du comportement du système. Les modèles métiers sont des modèles simples issus de la connaissance d'un expert qui généralement évaluent grossièrement le comportement physique d'un système, et sont donc entachés d'imprécision. Dans le cas du modèle adapté du niveau 2, nous proposons simplement un modèle à partir de la connaissance des échanges thermiques. Ce modèle va nous servir à illustrer la qualification de l'exactitude d'un modèle imprécis.

5 - IV.1 Présentation du modèle adapté

On a observé lors de l'analyse de l'exactitude du modèle adapté du niveau 2 (*cf.* § 5 - III.4.2) que l'erreur faite sur le calcul de la température de sortie de l'air était correcte par rapport aux valeurs seuil fixées. La qualification de l'exactitude du modèle montre donc que le modèle de composant qui consiste à évaluer la température maximale dans un élément comme la température moyenne de l'élément vu comme une boîte noire est peu exact.

Le modèle métier que nous proposons pour améliorer l'exactitude du modèle adapté de niveau 2 est un nouveau modèle de composant pour les éléments, il est lié à une connaissance du concepteur que l'on pourrait présenter qualitativement de la manière suivante :

« L'écart de température entre l'air et le cœur d'un élément est compris entre 23 et 33 K. »

On peut formaliser simplement ce modèle de composant de manière cohérente avec la syntaxe de *Constraint Explorer* (CE), à l'aide de deux inéquations :

$$T_{\max} - T_{air,sort} \geq 23 \qquad T_{\max} - T_{air,sort} \leq 33$$

5 - IV.2 Parcimonie

Le modèle est légèrement moins parcimonieux puisqu'on a introduit une variable et deux relations supplémentaires (inéquations).

La parcimonie du modèle adapté obtenu est de : **1/68**.

5 - IV.3 Spécialisation

La spécialisation du modèle n'a pas été modifiée puisqu'on n'a pas introduit d'hypothèses supplémentaires.

5 - IV.4 Exactitude et Précision

5 - IV.4.1 Stratégie de qualification de l'exactitude et de la précision

a. Référence

On utilise pour qualifier ce modèle la même référence que précédemment : le modèle présenté au paragraphe 5 - I.3.

b. Choix des variables et des points de comparaison

De manière à pouvoir comparer le modèle adapté aux deux autres modèles déjà qualifiés, nous utiliserons les mêmes variables de comparaison, ainsi que les mêmes points de comparaison. Ainsi, nous évaluerons l'exactitude du modèle métier sur la configuration présentée au paragraphe 5 - III.4.2b : à géométrie fixée et en faisant varier la valeur du débit d'air, on évalue l'exactitude du modèle pour la température maximale dans le bloc, l'écart maximal de température dans le bloc, la température de l'air en sortie du bloc, et enfin les pertes de charge.

c. Mesure de la précision, mesure de l'exactitude

Nous utilisons la définition donnée au chapitre 4 pour estimer l'exactitude du modèle imprécis, à savoir : nous utilisons l'algèbre des intervalles pour calculer l'erreur absolue. En outre, étant donné que la référence utilisée ne fait pas intervenir d'imprécision, on peut calculer un intervalle de l'erreur relative, en divisant l'intervalle de l'erreur absolue calculé par la valeur de la référence, ce qui permettra de comparer directement à l'exactitude du modèle de niveau 2 « précis » déjà estimée précédemment.

5 - IV.4.2 Sources d'imprécisions

Dans le modèle considéré, nous identifions deux sources d'imprécision. La première est liée à l'adaptation proposée du modèle : il s'agit de l'imprécision due au modèle de composant d'un élément. La seconde, donnée à titre d'illustration, est liée à l'imprécision due aux corrélations pour la détermination du coefficient d'échange convectif, dont nous n'avions pas tenu compte dans un premier temps. Par expérience, ce type de corrélation permet de fournir une bonne estimation de la valeur du coefficient d'échange thermique à +/- 15%.

Nous avons formalisé cette relation imprécise de la manière suivante dans le modèle ; pour chaque relation donnant la corrélation suivant le régime de l'écoulement, nous avons remplacé l'équation par une inéquation :

$$Nu = f_1(Pr, Re) \qquad \rightarrow \qquad \frac{\left|Nu - f_1(Pr, Re)\right|}{Nu} \leq 0{,}15$$

Ainsi, les seules sources d'imprécision de ce modèle sont liées à des relations imprécises, on ne prend pas en compte d'imprécision due à des variables incontrôlables. La précision du modèle sera donc mesurée sur la précision des quatre variables critères choisies, pour des variables d'entrées définies comme précédemment.

5 - IV.4.3 Qualification de l'exactitude et de la précision

a. Méthode de calcul

Pour chaque point de fonctionnement, défini par une combinaison des valeurs des variables d'entrée, on effectue le calcul de l'ensemble des autres variables. Dans le cas de ce modèle, le choix des variables, la structure et surtout l'imprécision du modèle impliquent que, pour chaque point, la propagation des valeurs des variables d'entrée est insuffisante pour déterminer complètement le point de fonctionnement.

La réduction de domaines par CE permet d'éliminer les valeurs des variables incohérentes avec les relations du modèle. Cette première phase de calcul n'est qu'une phase de réduction de domaines, trois cas se présentent alors :

1. il n'y a pas de solution : aucune combinaison de valeurs des variables n'est cohérente avec le système de relations du modèle, les domaines issus de la réduction sont vides.
2. la réduction de domaine donne une solution unique, c'est la seule combinaison possible de valeurs réelles cohérentes avec le modèle, c'est le cas qui s'est présenté lors des calculs faits pour qualifier les modèles de niveau 2 et de niveau 5 précédemment.
3. ou, la réduction de domaine aboutit à des domaines de valeurs. La phase de propagation est en fait une réduction de domaine par consistance locale, ce qui signifie que toutes les combinaisons des valeurs des domaines obtenus à l'issue de ce calcul ne sont pas nécessairement cohérentes avec le mo-

dèle, en revanche, s'il existe des solutions, alors elles sont nécessairement dans cet espace. Il est nécessaire d'effectuer une recherche des racines du problème qui permettent d'obtenir les valeurs des domaines des variables définissant les solutions du modèle (cohérence globale). En pratique, cette phase de recherche de solutions ne permet de donner qu'une approximation des domaines solutions à la précision du calcul près.

Dans notre cas, à l'issue de la phase de réduction de domaines, on peut déterminer pour chaque point de fonctionnement l'ensemble des valeurs des variables du modèle, exceptées six variables : ***Nu*** (nombre de Nusselt), ***NUT*** (nombre d'unité de transfert), ***eff*** (efficacité), ***h*** (coefficient d'échange thermique moyen), ***Tmax*** (température maximale au cœur du bloc) et ***Tmax_moy*** (température uniforme maximale dans un élément). Les domaines de ces variables sont des intervalles. Les six variables indéterminées sont en fait entachées par l'imprécision du modèle et, pour ces variables, les valeurs cohérentes avec le modèle ne peuvent être réduites à un seul réel à cause de la propagation de l'imprécision des relations du modèle.

La phase de recherche de solutions permet de déterminer, pour ces six variables, les intervalles des valeurs, cohérentes avec les valeurs des variables déterminées par la première phase du calcul. Pour chaque point de fonctionnement trouvé avec le modèle précis (*cf.* § 5 - III.4.2), on retrouve les mêmes valeurs pour les variables, exceptées pour les six variables imprécises, calculées après la phase de recherche de solutions. On a donc déterminé un point de fonctionnement à l'aide du modèle, il est défini par des intervalles de valeurs pour les six variables et par des valeurs réelles pour les autres variables (*cf.* tableau 5-3).

Tableau 5-3 : Résultats des variables critères et des variables intermédiaires entachées d'imprécision de chacun des deux modèles de niveau 2, pour le point de fonctionnement ΔT_{air}=5 K

	Variables critères					Variables intermédiaires			
	ΔP_{bat} (Pa)	T_{air_sort} (K)	ΔT_{max} (K)	T_{max} (K)	T_{max_moy} (K)	eff	Nu	NUT	h (W/m^{2}K)
modèle de niveau 2 imprécis	1167.2	299.4	4.24	[322.4,332.4]	[301.0,301.9]	[0.46,0.56]	[118.8,160.7]	[0.61,0.83]	[154.2,208.6]
modèle de niveau 2 précis	1167.2	299.4	4.24	301.4	301.4	0.51	136.6	0.71	177.3

Finalement, parmi les quatre variables critères choisies pour mesurer l'exactitude du modèle, seule la température maximale dans le bloc diffère avec le modèle imprécis. C'est également la seule des quatre variables critères qui soit imprécise. Les autres variables affectées par l'imprécision du modèle sont des variables intermédiaires.

b. Précision du modèle adapté

La précision du modèle adapté est estimée au travers de la taille des domaines des variables critères (VCr) pour chaque point de fonctionnement calculé. Les valeurs des VCr autres que la température maximale dans le bloc sont des valeurs réelles, le modèle – de précision « infinie » – permet donc de déterminer les valeurs de ces VCr, après calcul, à la précision du calcul près. En revanche, la température maximale dans le bloc est déterminée grâce à ce modèle par un intervalle de valeurs. Quel que soit le point de fonctionnement la taille de cet intervalle ne varie pas et il est toujours de longueur 10 (*cf.* figure 5-12).

c. Exactitude du modèle adapté

La figure 5-12 montre les résultats obtenus pour la température maximale dans le bloc avec les deux modèles de niveau 2 et le modèle de référence pour chaque point de fonctionnement. On s'aperçoit, que malgré l'imprécision intrinsèque au modèle adapté, il encadre la valeur de référence, alors que le premier modèle de niveau 2, s'il était précis donne une valeur de la température très éloignée de la référence. On observe donc grâce à cette figure l'intérêt de distinguer les mesures de l'exactitude et de la précision des modèles.

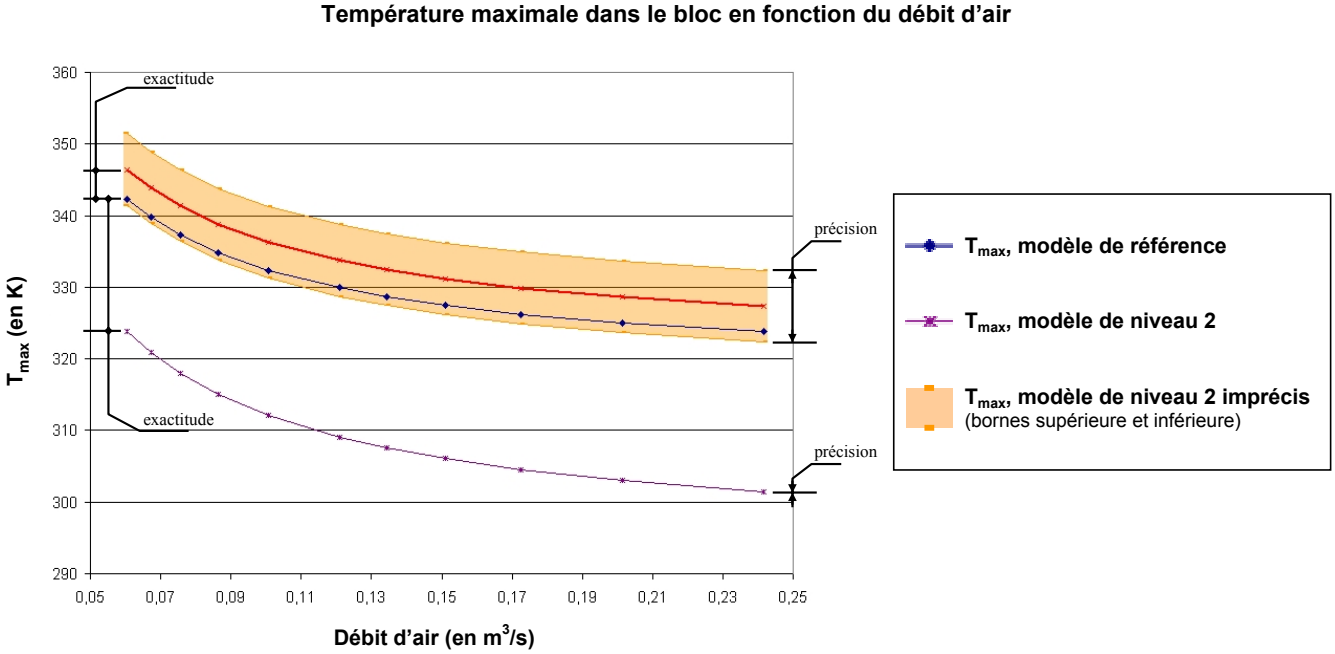


Figure 5-12 : Comparaison des courbes de température pour les modèles de niveau 2

La figure 5-13 représente quant à elle les mesures de l'exactitude des deux modèles de niveau 2 pour chaque point calculé. L'exactitude du modèle de niveau 2 adapté est connue de manière peu précise, puisque pour chaque point, elle est comprise entre 0 et 3%. On peut cependant remarquer que, si elle est imprécise, elle reste toujours inférieure à l'erreur du modèle de niveau 2, et l'intervalle de l'erreur

contient le point d'erreur nulle. On peut donc en conclure que le modèle adapté est plus exact et moins précis que le premier modèle formalisé de niveau 2.

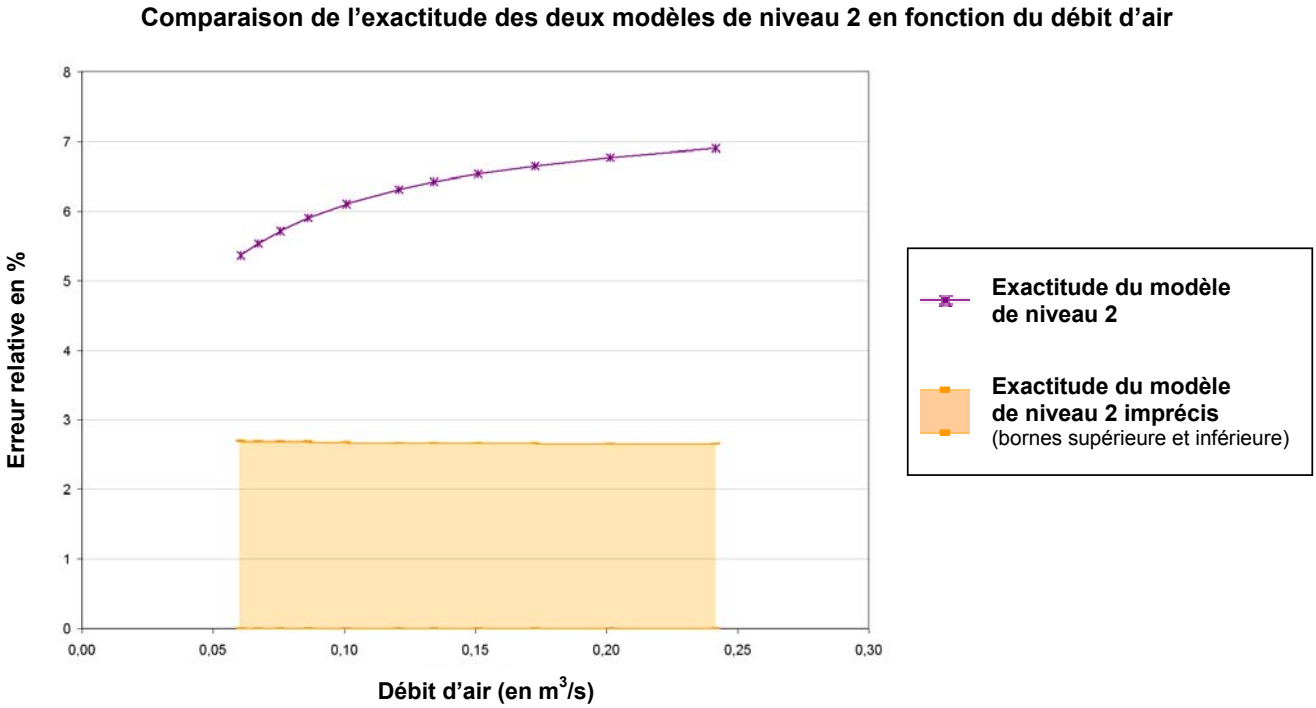


Figure 5-13 : Comparaison de l'exactitude pour les modèles de niveau 2

5 - V CONCLUSION

Ce chapitre a permis d'illustrer les procédures proposées au chapitre 4 et de montrer qu'elles permettent de faire des estimations en vue de comparer le PEPS de deux modèles.

On peut cependant, au vu de l'exemple, faire plusieurs constatations. En premier lieu, le choix de la référence, influence nécessairement le niveau d'exactitude du modèle, mais il agit également sur la facilité et la justesse avec laquelle on estime l'exactitude. Il est important de pouvoir utiliser une référence qui permette de définir des grandeurs comparables à celles du modèle à qualifier, pour pouvoir estimer correctement l'exactitude. Dans le cas contraire, il peut s'avérer difficile d'estimer correctement l'exactitude, ou cela impose de n'estimer l'exactitude que sur une partie du domaine d'application des modèles. On peut également affirmer que la qualification d'un modèle imprécis à l'aide du calcul par intervalles demande plus de calcul qu'un modèle précis.

Nous avons illustré l'intérêt de la qualification de modèle pour le choix de modèles sur l'exemple de la batterie. Le PEPS guide donc le choix des modèles de composant pendant la démarche de formalisation comme nous l'avons vu au chapitre 3. Il permet également de faire évoluer les modèles en proposant des formalisations plus adaptées aux objectifs.

Nous avons montré que le PEPS d'un modèle peut évoluer de sorte que le modèle transformé soit plus adapté aux objectifs de la modélisation sur un exemple simple d'adaptation. On a montré l'intérêt de distinguer exactitude et précision, puisque cette distinction a permis de proposer un modèle impré-

cis, mais plus exact que le modèle précédent. Néanmoins, un modèle imprécis présente l'inconvénient de demander plus de calculs et de conserver des indéterminations sur les variables critères.

Enfin, la qualification des modèles de batterie a permis de mettre en évidence que le PEPS des modèles peut fournir certaines règles pour aider à la résolution d'un problème par contraintes. L'exactitude et la précision intrinsèques du modèle, ainsi que l'ordre d'instanciation des variables influencent la qualité des solutions obtenues à l'aide des problèmes de satisfaction de contraintes.

CHAPITRE 6

CONCLUSIONS et PERSPECTIVES

6 - I CONTRIBUTIONS DE LA MÉTHODOLOGIE PROPOSÉE

6 - I.1 Formalisation de modèle en conception préliminaire

Nous proposons une démarche structurée de formalisation des modèles en conception préliminaire. Cette démarche s'appuie sur une vision fonctionnelle de la conception du produit. Elle utilise des outils de l'analyse fonctionnelle que nous avons adaptés : l'organigramme technique étendu, les blocs diagrammes fonctionnels. La démarche proposée permet de réaliser des modèles de produit à plusieurs niveaux systémiques en fonction des niveaux identifiés pour chaque bloc fonctionnel. Les modèles obtenus décrivent le comportement des composants du système et leurs interactions. Ils intègrent les variables juste nécessaires à la qualification des choix de conception : les variables de conception et les variables critères.

La méthode systématique développée permet ainsi de formaliser des modèles adaptés à la conception préliminaire et d'intégrer le calcul le plus tôt possible dans le processus de développement du produit, en cohérence avec l'avancement de la conception.

Nous avons illustré l'intérêt de la démarche proposée sur l'exemple d'un modèle de comportement pour la conception d'un système de ventilation de batterie.

6 - I.2 Démarche de qualification des modèles

Notre approche est basée sur l'étude de la finalité et du besoin lié aux modèles en conception préliminaire. Troussier fait la distinction entre modèles d'aide à la décision et modèles de validation, mais estime qu'ils diffèrent essentiellement en terme de coût et de précision [Troussier, 1999]. Notre travail, en ce qui concerne la qualification de modèles, a montré qu'il peut s'avérer insuffisant de ne considérer que la précision des modèles.

Selon nous, la capacité intrinsèque d'un modèle à produire une aide à la décision en conception préliminaire doit être estimée au travers des quatre caractéristiques suivantes : la parcimonie, l'exactitude, la précision et la spécialisation du modèle. Ces quatre critères doivent être estimés simultanément, car ils constituent une caractéristique intrinsèque des modèles que nous avons regroupée sous l'acronyme PEPS.

La qualification des modèles par le PEPS permet une caractérisation exhaustive de la capacité intrinsèque des modèles à produire une aide à la décision. Les quatre paramètres du PEPS sont indissociables. Le PEPS fournit un moyen d'évaluer la cohérence d'un modèle par rapport aux objectifs liés à la modélisation et présente un critère de comparaison des modèles entre eux en vue de faire un choix adapté aux phases préliminaires du développement de produit. Enfin, le PEPS permet de guider l'adaptation des modèles, lorsque ceux-ci ne conviennent pas.

L'exemple du modèle de la batterie a permis d'illustrer l'apport de la qualification des modèles dans le choix d'un modèle adapté aux objectifs de modélisation.

6 - I.3 Capitalisation des connaissances

Nous avons évoqué le fait que la structuration des modèles telle que nous la proposons peut constituer une base intéressante pour la capitalisation des connaissances en conception préliminaire.

La manière dont on a choisi de structurer la modélisation sur les modèles de composants, permet de proposer des mots-clés basés sur la définition des blocs fonctionnels modélisés pour repérer un modèle dans une base. La démarche structurée que nous proposons permet donc d'envisager à terme de disposer d'une base de données de modèles de composants. Ces modèles peuvent être repérés dans la base de connaissances par leur PEPS et structurés suivant les variables de conception et les variables critères.

Les objectifs de conception avant la modélisation peuvent alors guider le concepteur dans le choix des modèles de composant en fonction du besoin en terme de PEPS et par rapport aux variables qu'il a besoin de déterminer ou d'évaluer.

6 - I.4 Application, valorisation des travaux de recherche

Nos travaux ont contribué à l'évolution du solveur de problèmes de satisfaction de contraintes numériques développé par DASSAULT AVIATION, *Constraint Explorer*. L'aspect systématique de la démarche de formalisation de modèles et le fait qu'il soit basé sur des outils classiques de l'analyse fonctionnelle pourrait aboutir à la création d'un outil informatique qui serve de support pour le déroulement de la démarche, cet outil pourrait également s'appuyer sur la base de données de modèles qualifiés.

Cet outil informatique se situerait à l'interface d'outils d'aide à l'innovation et d'analyse d'un système comme MAL'IN® et d'un outil de résolution comme *Constraint Explorer*.

6 - I.5 Conception par contraintes

Différents auteurs ont montré l'intérêt de l'utilisation des approches par contraintes en conception de par l'aspect multidisciplinaire qu'elles peuvent recouvrir. Nous avons mis en évidence les différentes limites de ces approches qui demandent notamment une remise en cause des démarches classiques de modélisation et de conception. Une des difficultés liées à l'utilisation des outils de propagation par contraintes est liée à la formalisation de modèles adaptés. Ceci peut expliquer l'aspect encore confidentiel de l'utilisation de ces outils. La constitution d'une base de connaissances de modèles adaptés peut faciliter l'utilisation des outils par contraintes. À long terme, si on envisage une généralisation de l'utilisation de ces outils, la base de connaissances des modèles peut également s'enrichir par des modèles issus des catalogues constructeur de composants standard.

La méthodologie proposée a pour but de parvenir à une formalisation de modèles parcimonieux, exacts et précis, peu spécialisés et adaptés aux outils de conception par contraintes. Elle permet donc d'envisager la généralisation des outils de conception par contraintes pour l'évaluation et la sélection des concepts de solution en amont de la conception détaillée.

En outre, la complexité du problème à résoudre pour un solveur PSC peut conditionner rapidement la compréhension et la facilité de résolution du problème (par exemple : définition d'un ordre d'instanciation des variables, choix des domaines de variation, etc.). Comme nous l'avons vu au chapitre 5, la structuration du problème par les variables de conception et les variables critères ainsi que le PEPS du modèle peuvent également fournir des règles pour organiser la résolution d'un tel problème. Par exemple, nous avons vu au chapitre 5, comment l'ordre d'instanciation des variables du modèle pouvait influencer l'exactitude estimée à partir des solutions trouvées.

6 - II PERSPECTIVES DE RECHERCHE

6 - II.1 Formalisation de modèles pour la conception préliminaire

Nous avons basé la démarche sur le fait qu'il est possible de proposer des modèles de composants à différents niveaux systémiques, faisant intervenir différentes variables, ces modèles reposent sur les connaissances du concepteur. Cependant, le concepteur peut se reposer sur l'existence d'ouvrages proposant des modèles métiers généralement formalisés de telle sorte qu'ils font intervenir les variables de conception et les variables critères [Roark et Young, 2001, Kays et London, 1998, Idel'cik, 1986] pour le niveau systémique considéré.

Une voie de continuation ou d'approfondissement de ces travaux réside dans le fait de créer une base de données de modèles à différents niveaux systémiques et qualifiés en terme de PEPS. Cette base de données peut ensuite alimenter un outil d'aide à la conception tel que *Constraint Explorer*.

À long terme, on peut envisager la constitution d'une base de connaissances qui s'apparente à la constitution d'un outil similaire à l'outil d'aide au choix des matériaux en conception préliminaire [Ashby, 2000].

Cet objectif a déjà fait l'objet de travaux au sein du groupe par l'intermédiaire du stage de DEA de Vanessa Ho Kon Tiat, qui a abouti à la création d'une base de données de nombres adimensionnels et de modèles qui leurs sont associés [Ho Kon Tiat, 2003]. Ce travail est prolongé par une thèse qui vise à appliquer et compléter la démarche présentée dans ce document, dont le projet consiste à formaliser et qualifier un modèle pour la conception d'un système de refroidissement par flash détente.

6 - II.2 Qualification des modèles

On peut envisager d'approfondir la connaissance autour des quatre paramètres du PEPS d'un modèle. En effet, nous avons donné leur définition et des moyens de les estimer dans un cadre bien précis, néanmoins, la caractérisation du domaine d'évolution du PEPS intrinsèque au problème reste pour le moins imprécise jusqu'à maintenant.

On peut également s'interroger sur la possibilité de ne définir qu'un seul critère pour le PEPS, ou considérer des recherches autour de la caractérisation du PEPS d'un modèle global, à partir de la connaissance du PEPS de chacun des modèles de composant le constituant. Ceci demanderait la définition d'une forme d'arithmétique sur chacun des critères du PEPS.

De la même manière, le document a permis d'entrevoir comment chacun des paramètres peut évoluer lorsqu'on cherche à améliorer l'un d'eux. Nous avons indiqué quelles étaient les techniques d'adaptation de modèles qui permettaient de faire évoluer le PEPS des modèles. Il pourrait s'avérer judicieux d'approfondir la connaissance de l'effet de chacune des techniques d'adaptation de modèles identifiées sur le PEPS des modèles. On peut donc s'intéresser à l'approfondissement des connaissances sur les techniques d'adaptation de modèle et de fournir des guides pour le concepteur. À terme, l'objectif serait de proposer des règles pour guider le concepteur dans le choix des techniques à mettre en œuvre en fonction du PEPS initial du modèle à adapter.

6 - II.3 Qualification de modèles et aide à la décision en conception préliminaire

Le cadre classique des problèmes de satisfaction de contraintes associe à une contrainte deux états possibles : une contrainte est vraie ou fausse, une telle contrainte doit être satisfaite [Anglada, 2002] – elle est dite rigide. Il existe des extensions appelées PSC flexibles de cette définition classique qui associent une valeur graduelle aux contraintes et une structure d'ordre ou de combinaisons de ces valeurs associées aux contraintes [Dubois et al., 1996, Schiex et al., 1997]. Ces extensions permettent :

- de déterminer des solutions d'un problème de satisfaction de contraintes en intégrant une forme de préférences ou d'incertitude sur les valeurs des variables ou sur les contraintes,
- de définir des solutions partielles au problème lorsqu'il n'a pas de solutions avec des contraintes rigides.

Nous pensons que la parcimonie, l'exactitude, la précision et la spécialisation d'un modèle, qui fournissent une estimation de la capacité intrinsèque d'un modèle à fournir une aide à la décision, peuvent également apporter une forme de qualification des solutions des PSC.

Cet aspect de l'aide à la décision fait l'objet de la thèse de Raphaël Chenouard qui débute en 2004 au sein du laboratoire TREFLE. L'objectif de cette thèse est d'intégrer le concept de qualification de modèles au travers du PEPS dans la résolution des problèmes de satisfaction de contraintes.

NOMENCLATURE

Acronymes, abréviations

BDF	Bloc diagramme fonctionnel
CE	Constraint Explorer
CSP	*Constraint satisfaction problem*
FEE	Flux d'énergie électrique
FEMA	Flux d'énergie mécanique, dû à la circulation de l'air
FEMB	Flux d'énergie mécanique, dû au bruit
FET	Flux d'énergie thermique
FM	Flux de matière (poussières)
GSC	Graphe substances-champs
MC	Modèle de composant
MI	Modèle d'interaction
OT	Organigramme technique
OTe	Organigramme technique étendu
PEPS	Parcimonie, Exactitude, Précision, Spécialisation
PSC	Problème de satisfaction de contraintes
VCo	Variables de conception
VCr	Variables critères
VE	Véhicule électrique
VER	Volume élémentaire représentatif
VI	Variable intermédiaire

Variables

Lettres romaines

a	Variable intermédiaire	sans dimension
asp	Hauteur des aspérités (faces latérales des éléments)	m
A, A_{ech}, A_f	Aire d'échange, de frottement	m^2
b	Constante (modèles associés au FEMB)	$kg.m^2.s^{-5}$
$\mathbf{c_0}$	Concentration de l'ambiance de référence	$kg.m^{-3}$
$\mathbf{c^p}$	Concentration massique en poussières de la classe p	$kg.m^{-3}$
C^0	Capacité énergétique de la batterie à l'état de charge 0	J
Cp	Capacité calorifique massique	$J.kg^{-1}.K^{-1}$
d	Diamètre moyen de particules	m
D	Durée de vie	s
D_B	Coefficient de diffusion d'une particule	$m^2.s^{-1}$
e	Épaisseur	m
f	Facteur de Fanning	sans dimension
h	Coefficient local de transfert thermique par convection	$W.m^{-2}.K^{-1}$
H	Hauteur	m
k	Coefficient global de transfert thermique par convection	$W.m^{-2}.K^{-1}$
k_B	Constante de Boltzmann	$1{,}38.10^{-23}$ $J.K^{-1}$
K	Coefficient global moyen de transfert thermique	$W.m^{-2}.K^{-1}$
K	Coefficient de pertes de charge singulières	sans dimension
l	Largeur	m
L	Longueur	m
n	Nombre d'éléments	
N^{dB}	Niveau de puissance acoustique	dB
Nu	Nombre de Nusselt	sans dimension
NUT	Nombre d'unité de transfert	sans dimension
P	Pression	Pa
$\wp$	Puissance	W

Pr	Nombre de Prandtl	sans dimension
q	Débit massique	$kg.s^{-1}$
Q	Débit volumique	$m^3.s^{-1}$
Re	Nombre de Reynolds	sans dimension
S	Section	m^2
S_c	Nombre de Schmidt	sans dimension
t^+	Temps de relaxation adimensionnel	sans dimension
T	Température	K
U	Tension électrique	V
$U°$	Potentiel d'oxydo-réduction	V
U^*	Vitesse de frottement	$m.s^{-1}$
V	Vitesse de dépôt	$m.s^{-1}$
V^+	Vitesse adimensionnelle de dépôt	sans dimension
Vol	Volume	m^3
z	Altitude	m

Lettres grecques

α	Capacité énergétique	J
$\overline{\Delta}$	Rugosité relative	sans dimension
ΔP	Pertes de charge	Pa
ΔT	Écart de température	K
Δx	Largeur de volume élémentaire	m
Δy	Longueur de volume élémentaire	m
ε	Efficacité thermique	sans dimension
ε	Efficacité massique pour le filtre	sans dimension
η	Rendement	sans dimension
κ	Capacité massique avant colmatage	kg
λ	Conductivité thermique	$W.K^{-1}.m^{-1}$
μ	Viscosité dynamique	Pa.s
ν	Viscosité cinématique	$m^2.s^{-1}$
ξ	Coefficient de pertes de charge singulières	sans dimension
Π_t	Puissance volumique de chaleur	$W.m^{-3}$
ρ	Masse volumique	$kg.m^{-3}$
σ	Coefficient de pertes de charge singulières	sans dimension
τ_f	Contrainte pariétale de frottement	$N.m^{-2}$
φ	Flux de déposition de masse de poussières	$kg.m^{-2}.s^{-1}$
Φ	Flux de chaleur	W
χ	Fraction massique d'électrolyte dans le séparateur	sans dimension

Indices

air	air
air chaud	air chaud
bat	batterie
bloc ou *bbat*	bloc électrique de la batterie
e ou *ent*	entrée
élem	élément du bloc de batterie
élem,l élem,H élem,L	élément du bloc de batterie en largeur, en hauteur, en longueur
él+	électrode positive
él-	électrode négative
enc	encrassé, encrassement
éq	équivalent
spac ou *espac*	espacement entre alignement
f	feuille
fais	faisceau
filtre	filtre
interf	interface
i , j , k, l	indices repérant un volume élémentaire
p	plastique
p	poussières, particules de la classe p
pous	poussières
paroi	paroi
s ou *sort*	sortie
sep	séparateur
sol	solution électrolytique
sventil	système de ventilation
vent	ventilateur

Exposants

f	indice repérant une feuille
max	maximum
p	classe de poussières p

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

AFNOR — NF X 50-151, *Analyse de la valeur, analyse fonctionnelle - Expression fonctionnelle du besoin et cahier des charges fonctionnel*, (1991).

AFNOR — NF EN 1325-1, *Vocabulaire du management de la valeur, de l'analyse de la valeur et de l'analyse fonctionnelle - Partie 1 : analyse de la valeur et analyse fonctionnelle*, (1996).

AICVF, Association des Ingénieurs en Climatique, Ventilation et Froid — *Principes de l'aéraulique appliqués au génie climatique. Conception, installation et entretien des bouches, réseaux, ventilateurs et filtres,* Judet de la Combe A., Sesolis B. (eds), Collection des guides thématiques de l'AICVF, PYC édition (1991).

AICVF, Association des Ingénieurs en Climatique, Ventilation et Froid — *Bruit des équipements. Maîtriser l'acoustique des équipements techniques du bâtiment*, Cyssau R., Palenzuela D., François E. (eds), Collection des guides thématiques de l'AICVF, PYC édition (1997).

Akaike H. — *A new look at the statistical model identification,* IEEE Transactions on Automatic Control, vol. AC-19: 716-23 (1974).

Anglada A. — *Conception par Contraintes : Rapport sur les fonctionnalités de flexibilité requises et le traitement envisagé des problèmes sur-contraints dans Constraint Explorer*, rapport du projet RNTL CO2 (2002).

Antonsson E.K., Otto K.N. — *Imprecision in engineering design,* ASME Journal of Mechanical Design, invited paper, volume 117(B), (1995).

Ashby M.F. — *Choix des matériaux en conception mécanique*, Éditions Dunod (2000).

Azais C., Guilhot J.-P., Josserand P., Wild M. —*Acoustique industrielle*, Techniques de l'Ingénieur, traité Mesures et Contrôle R 3 120 (1995).

Bacchus F., Chen X., Van Beek P., Walsh T. — *Binary vs. non-binary constraints,* Artificial Intelligence, volume 140, issues 1-2 : 1-37 (2002).

Bailly A., Clerc-Renaud M., Rutman E., Ternant C. — *Traitement de l'air et climatisation, Aspects acoustiques et physico-chimiques*, Techniques de l'Ingénieur, traité Génie énergétique BE 9 273 (2001).

Balci O. — *Verification, Validation and Testing (chap. 10),* , in *Handbook of Simulation* : *Principles, Methodology, Advances, Applications, and Practice*, J. Banks (eds), John Wiley & Sons, pp. 335-393 (1998).

Barenblatt G.I.— *Dimensional analysis*, Gordon and Breach Science Publishers (1987).

Barthelemy J.F.M., Haftka R.T. — *Approximation Concepts for Optimum Structural Design - A Review*, Structural Optimization, volume 5, 129-144 (1993).

Barton R.R. — *Simulation Metamodels*, Proceedings of the 30th Winter Simulation Conference (1998).

Battaglia J.-L. — *Méthodes d'identification de modèles à dérivées d'ordre non entier et de réduction modale. Application à la résolution de problèmes thermiques inverses dans les systèmes industriels,* Mémoire d'Habilitation à Diriger les Recherches, Université de Bordeaux I (2002).

Ben Amara A. — *Contribution à l'intégration de la composante calcul dans une démarche de conception fonctionnelle intégrée*, Thèse de doctorat de l'Université de Valenciennes (1998).

Benhamou F., Older W. — *Applying Interval Arithmetic to Real, Integer and Boolean Constraints*, Journal of Logic Programming, volume 32, n°1, 1-24 (1997).

Bensana E., Mulyanto T., Verfaillie G. — *Dealing with Uncertainty in Design and Configuration Problems,* Workshop on Configuration 14th European Conference on Artificial Intelligence, Berlin, Allemagne, (2000).

Berliner C., Brimson J. A. — *Cost Management for Today's Advanced Manufacturing: The CAM-I Conceptual Design,* Harvard Business School Press (1988).

Bevington P., Robinson D.K. — *Data Reduction and Error Analysis for the Physical Sciences,* 2ème édition, McGraw-Hill Science, (2002).

Bocquet J.-C. — *Chapitre 1 : Ingénierie simultanée, conception intégrée*, in *Conception de produits mécaniques : méthodes, modèles, outils*, M. Tollenaere (eds), Hermès, p. 29-52 (1998).

Booker A. J. — *Design and Analysis of Computer Experiments*, 7th AIAA/USAF/NASA/ISSMO Symposium on Multidisciplinary Analysis & Optimization, St. Louis, MO, AIAA, volume 1, 118-128 AIAA-98-4757 (1998).

Borrett J. E. — *Formulation Selection for Constraint Satisfaction Problems: A Heuristic Approach,* Thèse de doctorat, University of Essex (UK), (1998).

Borrett J. E., Tsang E.P.K. — *A context for Constraint Satisfaction Problem, Formulation Selection,* Constraints, volume 6, 299-327 (2001).

Brückner S., Rudolph S. — *Dimensionally Homogeneous Neural Networks for System Identification*, Proceedings of International Workshop on Similarity Methods, Stuttgart, Allemagne, 179–199 (1998).

Cavaillès J. — *Méthodes de management de programme,* 2ème édition, DGA-Teknea (1995).

Chandrasekaran B. — *Design Problem Solving: A Task Analysis*, AI Magazine, volume 11, n°4, 59-71, (1990).

Cleary J.G. — *Logical Arithmetic,* Future Computing Systems, volume 2, n°2, 125-149 (1987).

Coatanéa E, Vareille J, Kuuva M. — *Utilisation d'indicateurs sans dimensions pour l'analyse des problèmes multi-contraintes et multiobjectifs en pré-conception*, Congrès Français de Mécanique, Nice, (2003).

Dal Zotto P., Larre J., Merlet A., Picau L. — *Génie énergétique*, Collection Memotech, Ed. Casteilla (1989).

Dessart N. — *Arithmétique par intervalles, résolution de systèmes linéaires et précision*, Mémoire de DEA d'Informatique fondamentale, École Normale Supérieure de Lyon, LIP (2004).

Dessombz O., Thouverez F., Laîné J.P., Jézéquel L. — *Structural design of uncertain mechanical systems using interval arithmetic*, in: Gogu G., Coutelier D., Chedmail P., Ray P. (eds), Recent Advances in Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering, Kluwer Academic Publisher, 443-452 (2003).

Dreyfus G. — *les Réseaux de neurones,* Mécanique Industrielle et Matériaux, n°51 (1998).

Dreyfus G., Martinez J.-M., Samuelides M., Gordon M.B., Badran F., Thiria S., Hérault L. — *Réseaux de neurones, Méthodologie et applications,* Eyrolles, 2ème édition (2004).

Doré R., Fischer X., Nadeau J.-P., Pailhes J. — *Méthodologie avancée pour la conception conforme utilisateur*, AIP Priméca La Plagne (2003).

Dubois D., Fargier H., Prade H. — *Possibility Theory in Constraint Satisfaction Problems: Handling Priority, Preference and Uncertainty*, Applied Intelligence, volume 6, n°4, 287-309 (1996).

Einberg G., Holmberg S.— *Characteristics of Particles and Their Behaviour in Ventilation Air*, International Journal of Ventilation, volume 2 n°1, (2003).

Eriksson D.M. — *A framework for the constitution of modelling processes: A proposition*, European Journal of Operational Research, Volume 145, p. 202-215, (2003).

Fargier H., Lang J., Martin-Clouaire R. et Schiex T. — *A constraint satisfaction framework for decision under uncertainty,* Proceedings of the 11th International Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence, Montreal Canada (1995).

Fischer X. — *Stratégie de conduite du calcul pour l'aide à la décision en conception mécanique intégrée; Application aux appareils à pression,* Thèse de doctorat de l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers (2000).

Fischer X., Nadeau J.-P., Sébastian P., Joyot P. — *Decision support in integrated mechanical design through qualitative constraints*, in Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering, Chedmail P., Cognet G., Fortin C., Mascle C., Pegna J. (eds), Kluwer, 35-42 (2002).

Forster M.R. — *Key Concepts in Model Selection: Performance and Generalizability,* Journal of Mathematical Psychology, 44, 205-231 (2000).

Gabet M.C. — *Dépôt de poussières au voisinage des tunnels routiers*, Rapport du Centre d'Études des Tunnels (1999).

Gass S.I., Harris C.M. — *Encyclopedia of Operations Research and Management Science*, Kluwer Academic Publishers (1996), in [Eriksson, 2003].

Gautier F., Giard V. — *Vers une meilleure maîtrise des coûts engagés sur le cycle de vie, lors de la conception de produits nouveaux,* Comptabilité, Contrôle, Audit, tome 6, vol.2, 43-75 (2000).

Giachetti R.E., Young R.E., Roggatz A., Eversheim W., Perrone G. — *A Methodology for the Reduction of Imprecision in the Engineering Design Process,* European Journal of Operational Research, volume 100, n° 2 : 277-292 (1997).

Granvilliers L., Monfroy E. — *Declarative Modelling of Constraint Propagation Strategies*, Proceedings of the First Biennial International Conference on Advances in Information Systems (ADVIS'2000), Izmir, Turkey, 232-238 (2000).

GRETh, Groupement pour la Recherche sur les Échangeurs thermiques — *Encrassement particulaire*, Manuel Technique, (1989).

Hamdi A., Yannou B., Landel E. — *Une stratégie de modélisation conceptuelle pour la prise en compte de performances vibro-acoustiques en préconception d'un berceau automobile*, Mécanique & Industries, volume 4, n°4, (2003).

Hoffmann R., Minkin V.I., Carpenter B.K. — *Ockham's Razor and Chemistry,* HYLE--International Journal for Philosophy of Chemistry, volume 3, pp. 3-28 (1997).

Ho Kon Tiat V. — *Mise en évidence de l'intérêt d'une démarche d'aide à la conception préliminaire inversée intégrée*, rapport de DEA de Mécanique et Énergétique de l'Université de Valenciennes (2003).

Hornik K., Stinchcombe M., White H. — *Multilayer feedforward network are universal approximates,* Neural Networks, volume 2 : 359-366, (1989).

Hornik K., Stinchcombe M., White H., Auer P. — *Degree of Approximation Results for Feedforward Networks Approximating Unknow Mappings and Their Derivates,* Neural Computation, volume 6, (1994).

Hugget A. — *Réseaux de neurones et algorithmes génétiques : application à la modélisation et à l'optimisation de séchoirs industriels*, Thèse de doctorat de l'université de Bordeaux I (1998).

Idel'cik I.E. — *Memento des pertes de charge, coefficients de pertes de charges singulières et de pertes de charge par frottement*, EDF (1986).

Jaulin L., Kieffer M., Didrit O., Walter E. — *Applied Interval Analysis*, Springer-Verlag (2001).

Jin R., Chen W., Simpson T. — *Comparative Studies of Metamodeling Techniques under Multiple Modeling Criteria*, Journal of Structural Optimization, 23(1), 1-13, (2001).

Joskowicz L., Sacks E. — *Automated modeling and kinematic simulation of mechanisms*, Computer Aided Design, volume 25, n°2, 106-118 (1993).

Kays W. M., London A.L. — *Compact Heat Exchangers*, Krieger Publishing Company, 3rd edition, (1998).

Kleijnen J.P.C., Sargent R.G.— *A Methodology for Fitting and Validating Metamodels in Simulation*, European Journal of Operational Research, Volume 120, Issue 1, (2000).

Kearfott R.B. — *Interval Computations: Introduction, Uses, and Resources,* Euromath Bulletin, volume 2, n°1, 95-112 (1996).

Lascaux P., Théodor R. — *Analyse numérique matricielle appliquée à l'art de l'ingénieur,* tome 1, Masson (1986).

Law W.S. — *Evaluating imprecision in engineering design,* PhD Thesis, California Institute of technology, (1996).

Lhomme O. — *Consistency techniques for numeric CSPs*, Proceedings of International Joint Conferences of Artificial Intelligence (IJCAI'93), Chambéry, France, 232-238 (1993).

Lottaz C. — *Rewriting Numeric Constraint Satisfaction Problems for Consistency Algorithms,* Proceedings of the 5th International Conference on Principles and Practice of Constraint Programming, (1999).

Lottaz C. — *Collaborative Design using Solution Spaces*, Thèse de Doctorat, EPFL Lausanne (2000).

Madelaine B. — *Détermination d'un modèle dynamique pertinent pour la commande : de la réduction à la construction,* Thèse de doctorat de l'École Nationale Supérieure de l'Aéronautique et de l'Espace (1998).

Meckesheimer M. — *A framework for metamodel-based design : subsystem metamodel assessment and implementation issues*, Thèse de Doctorat, Pennsylvania State University (2001).

Moore R.E. — *Interval Analysis*, Prentice-Hall (1966).

Mulyanto T. — *Conception, Configuration et Incertitude dans le cadre de la Programmation par Contraintes*, 5èmes Rencontres Jeunes Chercheurs en Intelligence Artificielle, Lyon (2000).

Nadeau J.-P. — *De l'analyse fonctionnelle à la créativité technique et à l'innovation*, cours ENSAM (2003).

OFTA, Observatoire Français des Techniques Avancées — *Logique floue*, Titli A. , Foulloy L. (eds), série Arago (14), Editions Masson (1994).

Otto K.N., Antonsson E.K. — *Modelling Imprecision in Product Design,* Proceedings of the Third IEEE International Conference on Fuzzy Systems FUZZ-IEEE '94, 346-351 (1994).

Pahl G., Beitz W. — *Engineering Design: A Systematic Approach*, Springer-Verlag, 2nde édition (1996).

Papavergos P.G., Hedley A.B. — *Particle deposition behavior from turbulent flows*, Chemical Engineering Research and Design Vol. 62, pp. 275-295 (1984).

Pesaran A.A., Keyser M. —*Thermal Characteristics of Selected EV and HEV Batteries*, Annual Battery Conference: Advances and Applications, Long Beach, California (2001).

Pourroy F., Remondini L., Yannou B., Vasiliu A., Clozel P. — *Chapitre 15. Modèles de comportement*, in *Conception de produits mécaniques : méthodes, modèles, outils*, M. Tollenaere (eds), Hermès (1998).

Powell P., Ribeiro R.A. — *Uncertainty in decision making,* in : Encyclopedia of Microcomputers, edited by A. Kent, J.G. Williams, volume 22, supplement 1, Marcel Dekker, 335-346 (1999).

Roark R.J., Young W.C. — *Roark's Formulas for Stress and Strain*, McGraw-Hill Professional Publishing, 7th edition (2001).

Rohsenow W.M., Hartnett J.P., Cho Y.I. — *Handbook of Heat Transfer*, Mc Graw-Hill Professional, 3rd edition (1998).

Rudolph S. — *On the Context of Dimensional Analysis in Artificial Intelligence*, Proceedings of International Workshop on Similarity methods, Stuttgart, Allemagne, 147-161 (1998).

Rudolph S., Bölling M. — *Constraint-based conceptual design and automated sensitivity analysis for airchip concept studies*, Deutscher Luft- und Raumfahrkongress, Stuttgart (2002).

Ryckelynck D. — *Réduction a priori de modèles thermomécaniques,* Comptes Rendus Mécanique 330 : 499–505 (2002).

Sacks J., Welch W.J., Mitchell T.J., Wynn H.P. — *Design and analysis of computer experiments,* Statistical Science, volume 4, n°4, 409-435 (1989).

Sam J. — *Constraint Consistency Techniques for Continuous Domains,* thèse de l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne (1995).

Sargent R.G. — *Validation and verification of Simulation Models,* Proceedings of the 1999 Winter Simulation Conference (1999).

Sargent R.G. — *Verification, Validation, and Accreditation of Simulation Models,* Proceedings of the 2000 Winter Simulation Conference (2000).

Sargent R.G. — *Some Approaches and Paradigms for Verifying and Validating Simulation Models,* Proceedings of the 2001 Winter Simulation Conference (2001).

Savransky S.D. — *Engineering of creativity : Introduction to TRIZ Methodology of Inventive Problem Solving*, CRC Press (2000).

Sawada H. — *Constraint-Based Computer Support for Insightful Multidisciplinary Engineering Design*, Thèse de Doctorat, University of Strathclyde (2001).

Sawada H., Yan X.T. —*Computer Support for Insightful Engineering Design based on generic and rigorous principles of symbolic algebra*, International Conference on Integrated Design qnd Manufacturing in Mechanical Engineering, Clermont-Ferrand, France (2002).

Sébastian P. — *Approximation et Intégration de Modèles pour l'Aide à la Décision en Génie des Procédés,* Mémoire d'Habilitation à diriger les recherches, Université de Bordeaux I (2003).

Scaravetti D. — *Formulation préalable d'un problème de conception, pour l'aide à la décision en conception préliminaire*, Thèse de Doctorat de l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers (2004).

Scaravetti D., Nadeau J.-P., Sébastian P. — *Structuring Functions and constraints formulation for enhanced embodiment design*, International CIRP Design Seminar, 12-14 May 2003, Grenoble, France, (2003).

Scaravetti D., Nadeau J.-P., Sébastian P., Pailhès J. — *Aided decision-making for an embodiment design problem*, Advances in Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering, Bramley A., Brissaud D., Coutellier D. (eds), Kluwer Academic Press (Accepté en juin 2004).

Scaravetti D., Nadeau J.-P., Pailhès J., Sébastian P. — *Structuring of embodiment design problem based on the product lifecycle*, International Journal of Product Development, Special Issue on Product Lifecycle Management, (Accepté en juillet 2004).

Schiex T., Fargier H., Verfaillie G. — *Problèmes de satisfaction de contraintes valués,* Revue d'Intelligence Artificielle, volume 11, n°3, 339-373 (1997).

Scott M.J., Antonsson E.K. — *Preliminary vehicle structure design application,* Proceedings of the 10th International Conference on Design Theory and Methodology ASME (1998).

Shephard M.S., Baehmann P.L., Georges M.K., Korngold E.V. — *Framework for the reliable generation and control of analysis idealizations*, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, volume 82, 257-280 (1990).

Simpson T., Dennis L., Chen W. — *Sampling Strategies for Computer Experiments: Design and Analysis,* International Journal of Reliability and Application, volume 2, n°3, 209-240 (2002).

Sippola M. R., Nazaroff W.W. — *Particle Deposition from Turbulent Flow: Review of Published Research and Its Applicability to Ventilation Ducts in Commercial Buildings*, Lawrence Berkeley National Laboratory Report (2002).

Sohlenius G. — *Concurrent Engineering*, Annals of the CIRP, volume 41 n° 2, (1992).

Soler L. — *Introduction à l'épistémologie*, Ellipses (2000).

Stergiou K. — *On Algorithms for Decomposable Constraints,* Proceedings of the Second Hellenic Conference on Artificial Intelligence, 65-71 (2002).

SNCT, Syndicat National de la Chaudronnerie, de la tôlerie et de la Tuyauterie Industrielle — *Code Français de construction des appareils à pression,* (2000).

Tassinari R. — *Pratique de l'analyse fonctionnelle*, Dunod (2003).

Taylor E.S. —*Dimensional analysis for engineers*, Clarendon press, Oxford (1974).

Tollenaere M. (eds)—*Conception de produits mécaniques : méthodes, modèles, outils*, Hermès (1998).

Travé-Massuyès L., Dague P., Guerrin F.— *Le raisonnement qualitatif pour les sciences de l'ingénieur,* Éd. Hermès (1997).

Troussier N. — *Contribution à l'intégration du calcul mécanique dans la conception de produits techniques : proposition méthodologique pour l'utilisation et la réutilisation,* Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier-Grenoble I (1999).

Troussier N., Pourroy F., Tollenaere M.— *Information Structuring for Use and Reuse of Mechanical Analysis Models in Engineering Design,* Journal of Intelligent Manufacturing, 61-71 (1999).

Wolper P. — *Introduction à la calculabilité,* InterEditions, 2ème édition (2001).

Yannou B. — *Aide à la conception qualitative de systèmes dynamiques*, Thèse de Doctorat, ENS Cachan (1994).

Yannou B.—*Chapitre 3 : Analyse de la Valeur*, in *Conception de produits mécaniques : méthodes, modèles, outils*, M. Tollenaere (eds), Hermès, p. 77-104 (1998).

Yannou B. — *Préconception de produits*, Mémoire d'Habilitation à diriger les recherches, École Centrale Paris (2001).

Zablit P., Zimmer L. — *"Global aircraft" predesign based on constraint propagation and interval analysis*, CEAS Conference on Multidisciplinary Aircraft Design and Optimization, Köln, Allemagne, (2001).

Zimmer L. — *Présentation du projet CO2*, Journées S3P, Bayonne (2001).

Références électroniques, sites internet :

CO2 : COnception par COntraintes
http://co2.criltechnology.com/
dernière mise à jour : juillet 2003

CON'FLEX : un logiciel de résolution de problèmes de satisfaction de contraintes (CSP)
http://www.inra.fr/bia/T/conflex/
dernière mise à jour : mars 1998

MAL'IN, Méthode d'Aide à L'Innovation,
http://www.lept-ensam.u-bordeaux.fr/malin
dernière mise à jour : octobre 2003

OQLF, Office Québécois de la langue française, Dictionnaire terminologique :
http://www.oqlf.gouv.qc.ca/ressources/gdt_bdl2.html
dernière mise à jour : juillet 2004

MAPLE, Logiciel de calcul formel :
http://www.maplesoft.com
dernière mise à jour : 2004

Dictionnaire électronique :

Hachette Dictionnaire Français, Hachette Multimédia / Hachette Livre, (1999).

ANNEXES

ANNEXE 1 : QUALIFICATION DE LA CONCEPTION : LOIS D'ÉVOLUTION TRIZ
AIDE À LA CONSTRUCTION DE GSC : TABLEAUX MAL'IN

ANNEXE 2 : MODÈLES D'INTERACTION, CAS SUPPLÉMENTAIRES (CHAP. 3)

ANNEXE 3 : CODES PROFESSIONNELS CONSTITUANT DES RÉFÉRENCES

ANNEXE 4 : MODÈLES CONSTRAINT EXPLORER

ANNEXE 1 :

QUALIFICATION DE LA CONCEPTION : TROIS PREMIÈRES LOIS D'ÉVOLUTION TRIZ

Lois d'évolutions utilisables pour traduire la pertinence de la conception en phase 4

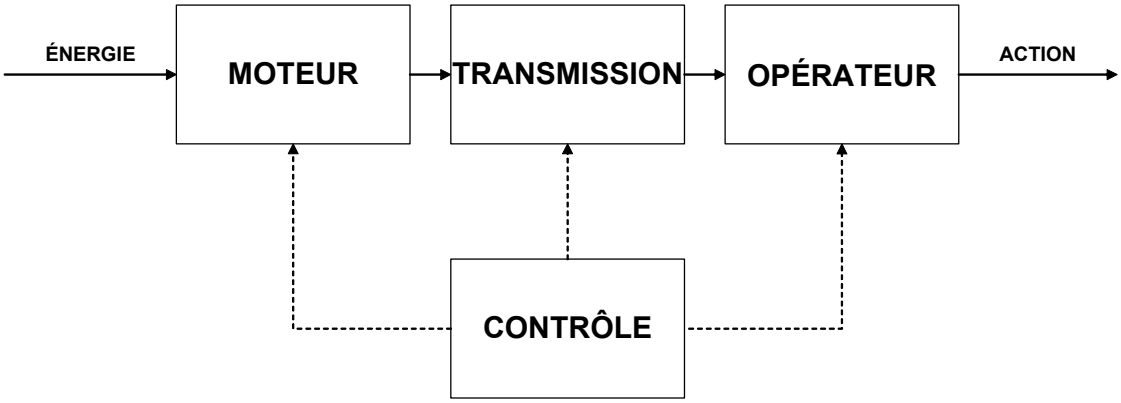
Loi 1 : Intégralité des parties

Pour réaliser l'action incriminée, une énergie doit être utilisée, transformée et transmise.

Chacune des 4 entités suivantes doit être présente dans le système et avoir une utilité minimale lors la réalisation de l'action :

- Une entité motrice
- Une entité de transmission
- Une entité opératrice
- Une entité de contrôle

Au moins une des entités doit être contrôlable.



Loi 2 : Conductivité énergétique

Le système doit permettre le libre passage de l'énergie entre toutes ses entités lors la réalisation de l'action (elle peut être transmise par contact ou sans contact). La transmission d'énergie doit être la plus efficace possible.

Évolutions envisageables pour l'amélioration de la conductivité énergétique :

- Raccourcissement du trajet énergétique
- Réduction des transformations successives
- Transformation, amélioration des paramètres de transfert
- Accroissement de la contrôlabilité des champs énergétiques

Loi 3 : Coordination des rythmes

Les fréquences, vibrations, périodicités doivent être cohérentes dans toutes les entités du système lors la réalisation de l'action.

Évolutions envisageables pour l'amélioration de la coordination des rythmes :

- Couplages pour améliorer des performances en phase, en opposition de phase, en résonance accordée et en compensation
- Découplages pour éliminer des effets indésirables : indépendance

OUTILS D'AIDE À LA CONSTRUCTION DE GRAPHES D'ASSOCIATION SUBSTANCES-CHAMPS, TABLEAUX MAL'IN

Préalable à la construction du graphe :

On a défini le niveau systémique.

Par l'analyse fonctionnelle, on connaît les fonctions de service et les fonctions contraintes associées au système global.

On connaît la fonction machine (fonction utile principale) réalisée par le bloc fonctionnel incriminé ou à réaliser.

Construction du graphe fonctionnel :

La logique proposée part du bloc diagramme fonctionnel, s'il n'est pas réalisé, suivre la démarche suivante :

- Énumérer les composants du bloc fonctionnel
- Énumérer les milieux extérieurs
- Énumérer les flux fonctionnels : fonctions de service et fonctions contraintes
- Réaliser le graphe de contact entre les composants du bloc fonctionnel et les milieux extérieurs, c'est-à-dire entre les sous-systèmes du système :

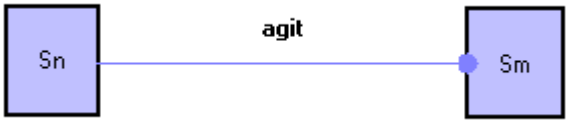


- Placer les flux fonctionnels



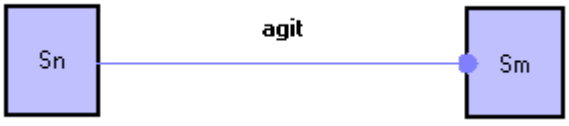
Construction du graphe des associations substances-champs :

- Exprimer le flux de contact (action mécanique) ou le flux fonctionnel par un verbe qualifiant l'action d'un composant (substance) sur l'autre :

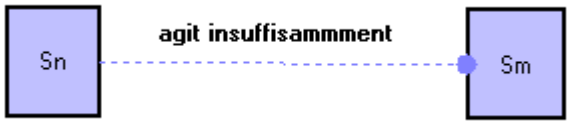


- Cet effet est il utile, insuffisant ou néfaste (nuisible) ?

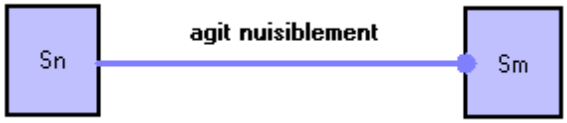
Effet utile



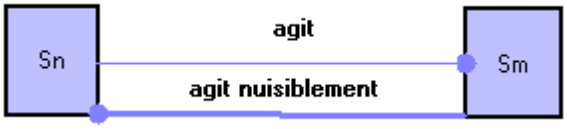
Effet utile insuffisant



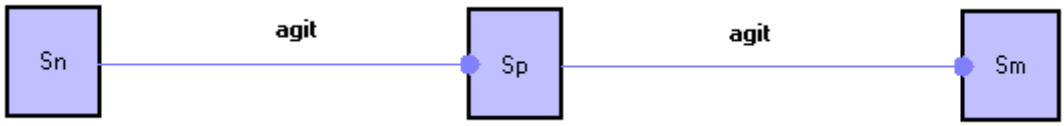
Effet nuisible



Des effets nuisibles sont-ils générés par les flux fonctionnels déjà identifiés ?



Est-il intéressant d'ajouter des éléments transportés par les flux de matière (ex : fluides, poudre, poussière,…) ?



Est-il intéressant de prendre en compte les différents composants de ces flux de matière (air humide = air sec + vapeur d'eau) ?



Aide à l'identification de flux

Flux générés par des gradients de paramètres

Les gradients des paramètres d'état ou pertinents des composants (substances) peuvent-ils générer des flux :

Paramètres	**Effet produit**	**Caractérisation**	**Nom de la loi**
Température	Flux de chaleur conductif	Solides en contact	Fourier
	Flux de chaleur convectif	Interface solide/fluide	Newton
	Flux de chaleur rayonnant	Solides en regard, milieu intermédiaire transparent	Stéphan-Boltzmann
	Flux d'électrons	Soudure/Solides conducteur	Seebeck
Pression	Débit de fluide	Dans un fluide	
	Migration de fluide dans le solide : Fluide continu Capillarité	Dans un solide dit capillaroporeux	Darcy
Pression partielle ou Concentration	Diffusion d'un composant dans l'autre (et inversement)	Dans un mélange de fluides	Fick
Potentiel Electrique	Flux d'électrons	Dans les fluides ou solides conducteurs	Ohm
	Champ magnétique	Dans les fluides ou solides	Biot Savart
Champ magnétique	Flux d'électrons	Dans les fluide ou solides conducteurs	Faraday
Potentiel chimique	Flux de matière (électrolyse)	Entre solides, milieu conducteur	

Ces effets générés par les gradients de paramètres sont-ils utiles ou nuisibles ? Voulez-vous en tenir compte ?

Les effets générés par les gradients de paramètres induisent d'autres effets.

Paramètres	**Effet produit**	**Effet induit**
Température	Flux de chaleur	Dilatation/Rétraction/Jeu/Bridage Fluage
	Flux d'électrons	Charge/Décharge électrique
Pression	Débit de fluide	Fuites
	Migration de fluide dans le solide	Dilatation/Rétraction/Jeu/Bridage Pollution, Encrassement
Pression partielle ou Concentration	Diffusion d'un composant dans l'autre (et inversement)	Pollution, Dépôt, Encrassement Givrage, Prise en glace
Potentiel Electrique	Flux d'électrons	Charge/Décharge électrique
	Champ magnétique	Polarisation
Champ magnétique	Flux d'électrons	Charge/Décharge électrique
Potentiel chimique	Flux de matière (électrolyse)	Corrosion

Ces effets induits sont-ils utiles ou nuisibles ? Voulez-vous en tenir compte ?

Effets mécaniques générés par des flux de contact

Les contacts réels sont générateurs d'effets locaux.

Surfaces en contact	**Effet produit**	**Caractérisation**	**Nom de la loi**
Zone de contact localisée	Champ de pression	Vitesse relative nulle : adhérence Vitesse relative non nulle : frottement	Hertz (action normale) Coulomb
	Flux d'énergie thermique	Vitesse relative non nulle : frottement	
	Flux d'énergie sonore	Vitesse relative non nulle : frottement	
	Flux d'énergie de déformation	Déformation du solide	Énergie de déformation
Zone de contact surfacique étendue	Champ de pression	Vitesse relative nulle : adhérence Vitesse relative non nulle : frottement	Matage (action normale) Coulomb
	Flux d'énergie thermique	Vitesse relative non nulle : frottement	
	Flux d'énergie sonore	Vitesse relative non nulle : frottement	
	Flux d'énergie de déformation	Déformation du solide	Énergie de déformation

Ces effets sont-ils utiles ou nuisibles ? Voulez-vous en tenir compte ?

Effets mécaniques générés par des mouvements de solides

Le système comporte t-il des entités en mouvement qui génèrent des effets d'inertie (forces centrifuge, masses inertielles) ? Ces effets sont-ils utiles ou nuisibles ? Voulez-vous en tenir compte ?

Effets dus à des champs ou à des substances distantes

Des champs immatériels sont-ils présents ? Ces effets sont-ils utiles ou nuisibles ? Voulez-vous en tenir compte ?

- Attractions (pesanteur, aimants)
- Sons, Ultrasons
- Optique
- Électriques
- Rayonnements
- Magnétiques,…

ANNEXE 2 :

MODÈLES D'INTERACTION, CAS SUPPLÉMENTAIRES (CHAP. 3)

- **Cas supplémentaires au modèle d'interaction de niveau 4 pour le flux d'énergie thermique :**

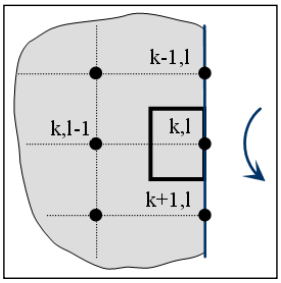
si f=1, $T^f = \dfrac{e^f \cdot k_i \cdot T^i_{air} + e^f \cdot k_{i+1} \cdot T^{i+1}_{air} + \dfrac{2 \cdot \lambda^f \cdot l}{e^f}\left(\dfrac{e^{f+1} \cdot \lambda^{f+1}}{e^f \cdot \lambda^f + e^{f+1} \cdot \lambda^{f+1}} \cdot T^{f+1}\right) + \Pi_t \cdot e^f \cdot l}{e^f \cdot k_i + e^f \cdot k_{i+1} + \dfrac{2 \cdot \lambda^f \cdot l}{e^f}\left(\dfrac{e^{f-1} \cdot \lambda^{f-1}}{e^f \cdot \lambda^f + e^{f-1} \cdot \lambda^{f-1}} + \dfrac{e^{f+1} \cdot \lambda^{f+1}}{e^f \cdot \lambda^f + e^{f+1} \cdot \lambda^{f+1}}\right)}$

si f=n, $T^f = \dfrac{e^f \cdot k_i \cdot T^i_{air} + e^f \cdot k_{i+1} \cdot T^{i+1}_{air} + \dfrac{2 \cdot \lambda^f \cdot l}{e^f}\left(\dfrac{e^{f-1} \cdot \lambda^{f-1}}{e^f \cdot \lambda^f + e^{f-1} \cdot \lambda^{f-1}} \cdot T^{f-1}\right) + \Pi_t \cdot e^f \cdot l}{e^f \cdot k_i + e^f \cdot k_{i+1} + \dfrac{2 \cdot \lambda^f \cdot l}{e^f}\left(\dfrac{e^{f-1} \cdot \lambda^{f-1}}{e^f \cdot \lambda^f + e^{f-1} \cdot \lambda^{f-1}} + \dfrac{e^{f+1} \cdot \lambda^{f+1}}{e^f \cdot \lambda^f + e^{f+1} \cdot \lambda^{f+1}}\right)}$

- **Cas supplémentaires au modèle d'interaction de niveau 5 pour le flux d'énergie thermique :**
  - Si le volume élémentaire est sur un « bord » :

k=1, l quelconque :

$$T_{k,l} = \frac{\dfrac{\Delta x}{\Delta y} \cdot T_{k+1,l} + \dfrac{\Delta y}{\Delta x} \cdot \dfrac{\left(T_{k,l+1} + T_{k,l-1}\right)}{2} + \dfrac{\Pi_t \cdot \Delta x \cdot \Delta y}{2 \cdot \lambda}}{\dfrac{\Delta x}{\Delta y} + \dfrac{\Delta y}{\Delta x}}$$

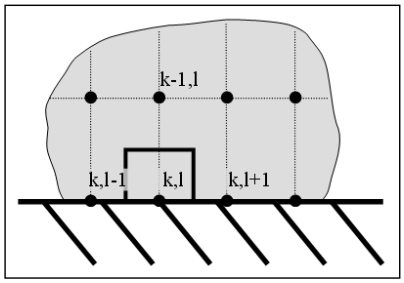


k=n, l quelconque :

$$T_{k,l} = \frac{\dfrac{\Delta x}{\Delta y} \cdot T_{k-1,l} + \dfrac{\Delta y}{\Delta x} \cdot \dfrac{\left(T_{k,l+1} + T_{k,l-1}\right)}{2} + \dfrac{\Pi_t \cdot \Delta x \cdot \Delta y}{2 \cdot \lambda}}{\dfrac{\Delta x}{\Delta y} + \dfrac{\Delta y}{\Delta x}}$$

l=1, k quelconque :

$$T_{k,l} = \frac{\dfrac{\Delta y \cdot k_-}{\lambda} \cdot T_{air-} + \dfrac{\Delta x}{\Delta y} \cdot \dfrac{\left(T_{k-1,l} + T_{k+1,l}\right)}{2} + \dfrac{\Delta y}{\Delta x} \cdot T_{k,l+1} + \dfrac{\Pi_t \cdot \Delta x \cdot \Delta y}{2 \cdot \lambda}}{\dfrac{\Delta y \cdot k_-}{\lambda} + \dfrac{\Delta x}{\Delta y} + \dfrac{\Delta y}{\Delta x}}$$



l=m, k quelconque :

$$T_{k,l} = \frac{\dfrac{\Delta y \cdot k_+}{\lambda} \cdot T_{air+} + \dfrac{\Delta x}{\Delta y} \cdot \dfrac{\left(T_{k-1,l} + T_{k+1,l}\right)}{2} + \dfrac{\Delta y}{\Delta x} \cdot T_{k,l-1} + \dfrac{\Pi_t \cdot \Delta x \cdot \Delta y}{2 \cdot \lambda}}{\dfrac{\Delta y \cdot k_+}{\lambda} + \dfrac{\Delta x}{\Delta y} + \dfrac{\Delta y}{\Delta x}}$$

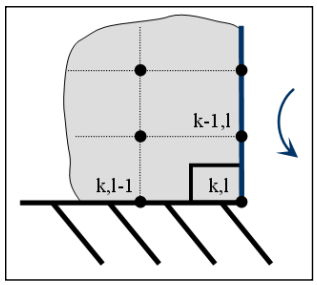
- Si le volume élémentaire est dans un « coin » :

k=1, l=1 :

$$T_{k,l} = \frac{\frac{\Delta y \cdot k_{-}}{\lambda} \cdot T_{air-} + \frac{\Delta x}{\Delta y} \cdot T_{k+1,l} + \frac{\Delta y}{\Delta x} \cdot T_{k,l+1} + \frac{\Pi_t \cdot \Delta x \cdot \Delta y}{2 \cdot \lambda}}{\frac{\Delta y \cdot k_{-}}{\lambda} + \frac{\Delta x}{\Delta y} + \frac{\Delta y}{\Delta x}}$$

k=n, l=1 :

$$T_{k,l} = \frac{\frac{\Delta y \cdot k_{-}}{\lambda} \cdot T_{air-} + \frac{\Delta x}{\Delta y} \cdot T_{k-1,l} + \frac{\Delta y}{\Delta x} \cdot T_{k,l+1} + \frac{\Pi_t \cdot \Delta x \cdot \Delta y}{2 \cdot \lambda}}{\frac{\Delta y \cdot k_{-}}{\lambda} + \frac{\Delta x}{\Delta y} + \frac{\Delta y}{\Delta x}}$$



k=1, l=m :

$$T_{k,l} = \frac{\frac{\Delta y \cdot k_{+}}{\lambda} \cdot T_{air+} + \frac{\Delta x}{\Delta y} \cdot T_{k+1,l} + \frac{\Delta y}{\Delta x} \cdot T_{k,l-1} + \frac{\Pi_t \cdot \Delta x \cdot \Delta y}{2 \cdot \lambda}}{\frac{\Delta y \cdot k_{+}}{\lambda} + \frac{\Delta x}{\Delta y} + \frac{\Delta y}{\Delta x}}$$

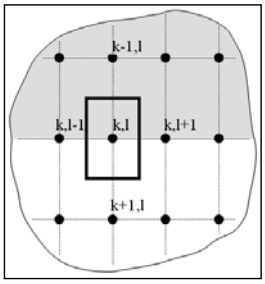
k=n, l=m :

$$T_{k,l} = \frac{\frac{\Delta y \cdot k_{+}}{\lambda} \cdot T_{air+} + \frac{\Delta x}{\Delta y} \cdot T_{k-1,l} + \frac{\Delta y}{\Delta x} \cdot T_{k,l-1} + \frac{\Pi_t \cdot \Delta x \cdot \Delta y}{2 \cdot \lambda}}{\frac{\Delta y \cdot k_{+}}{\lambda} + \frac{\Delta x}{\Delta y} + \frac{\Delta y}{\Delta x}}$$

- Si le volume élémentaire est « à cheval » sur deux feuilles :

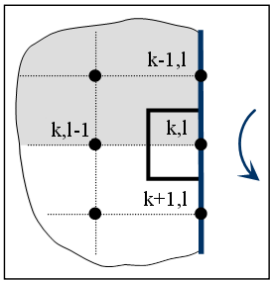
k=i_0, l quelconque :

$$T_{k,l} = \frac{\frac{\Delta x}{\Delta y} \cdot \left(\lambda_{k-1} \cdot T_{k-1,l} + \lambda_{k+1} \cdot T_{k+1,l}\right) + \frac{\Delta y}{\Delta x} \cdot \left(\overline{\lambda_k} \cdot T_{k,l+1} + \overline{\lambda_k} \cdot T_{k,l-1}\right) + \Pi_t \cdot \Delta x \cdot \Delta y}{\left(\frac{\Delta x}{\Delta y} + \frac{\Delta y}{\Delta x}\right) \cdot \left(\lambda_{k-1} + \lambda_{k+1}\right)}$$



k=i_0, l=1 :

$$T_{k,l} = \frac{\Delta y \cdot k_{-} \cdot T_{air-} + \frac{\Delta x}{\Delta y} \cdot \left(\frac{\lambda_{k-1}}{2} \cdot T_{k-1,l} + \frac{\lambda_{k+1}}{2} \cdot T_{k+1,l}\right) + \frac{\Delta y}{\Delta x} \cdot \frac{\left(\lambda_{k-1} + \lambda_{k+1}\right)}{2} \cdot T_{k,l+1} + \frac{\Pi_t \cdot \Delta x \cdot \Delta y}{2}}{\Delta y \cdot k_{-} + \left(\frac{\Delta x}{\Delta y} + \frac{\Delta y}{\Delta x}\right) \cdot \frac{\left(\lambda_{k-1} + \lambda_{k+1}\right)}{2}}$$



k=i_0, l=m :

$$T_{k,l} = \frac{\Delta y \cdot k_{+} \cdot T_{air+} + \frac{\Delta x}{\Delta y} \cdot \left(\frac{\lambda_{k-1}}{2} \cdot T_{k-1,l} + \frac{\lambda_{k+1}}{2} \cdot T_{k+1,l}\right) + \frac{\Delta y}{\Delta x} \cdot \frac{\left(\lambda_{k-1} + \lambda_{k+1}\right)}{2} \cdot T_{k,l-1} + \frac{\Pi_t \cdot \Delta x \cdot \Delta y}{2}}{\Delta y \cdot k_{+} + \left(\frac{\Delta x}{\Delta y} + \frac{\Delta y}{\Delta x}\right) \cdot \frac{\left(\lambda_{k-1} + \lambda_{k+1}\right)}{2}}$$

ANNEXE 3 :

CODES PROFESSIONNELS CONSTITUANT DES RÉFÉRENCES

Nous proposons ici une liste non exhaustive de codes de calcul professionnels. Ces codes fournissent des règles de calcul issues de l'expérience des ingénieurs d'une spécialité et constituent, de fait, des références dans leurs domaines. On peut envisager de les utiliser comme références pour qualifier l'exactitude d'un modèle, selon le domaine d'application du modèle. Certains de ces codes ont été remplacés par des directives ou des réglementations européennes, mais ils peuvent être utilisés, car ils permettent de trouver des relations parcimonieuses.

- CODAP : Code de construction des appareils à pression [SNCT, 2000].
- CODETI : Code de construction des tuyauteries industrielles.
- CODRES : Code français de construction des réservoirs cylindriques en acier.
- COVAP : Code de construction des générateurs de vapeur.
- Eurocodes : Règles de calcul de structures en acier, béton, bois, etc.
- PS92 : Règles de construction parasismique.
- Règles NV 65 modifiées 99 et N 84 modifiées 2000 : Règles définissant les effets de la neige et du vent sur les constructions.
- Règles BAEL 91 modifiées 99 et BPEL 91 - Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions en béton armé (resp. en béton précontraint) suivant la méthode des états-limites.
- Règles FEM : règles de dimensionnement des appareils de levage (Fédération Européenne de la Manutention).
- Code RCCM : Règles de conception et de construction de matériels nucléaires.

Codes étrangers :

- Code ASME : règles de calcul de l'ASME (American Society of Mechanical Engineers).
- AD-Merkblatt : codes de construction allemands.
- British Standards (BS) : codes de construction anglais.

ANNEXE 4 :

MODÈLES CONSTRAINT EXPLORER

Modèle adapté du niveau 5

```
(*******************************************************************************)
(* Modele adapte de conception preliminaire d'un systeme de refroidissement de batterie *)
(*******************************************************************************)
(* Declaration et domaines de variation des variables *)
(* variables entieres *)
n_neg : int ; n_neg=[0,100] ;                    nel_l : int ; nel_l=[0,100] ;
n_pos : int ; n_pos=[0,100] ;                    nel_L : int ; nel_L=[0,100] ;
n_sep : int ; n_sep=[0,100] ;                    nf : int ; nf=[0,100] ;
nel_H : int ; nel_H=[0,100] ;

(* variables enumerees symboliques *)
      ventil : enumS ; ventil in {doma270203 , K_KV_315L , K_KV_315M , K_KV_200M} ;
      (* variables reelles *)
asp=[0,0.01] ;                                   l_p>0 ;
deq>0 ;                                          l_pos>0 ;
DP_bat=[0,10000] ;                               l_sep>0 ;
dT_max>0 ;                                       l_sol>0 ;
e_neg=[0,0.01] ;                                 Lel=[0,1] ;
e_pos=[0,0.01] ;                                 lf=[0,0.5] ;
e_sep=[0,0.01] ;                                 Lf=[0,0.5] ;
ep=[0,0.05] ;                                    mu_moy=[1.5e-5,2.5e-5] ;
esp=[0,0.1] ;                                    Nu>0 ;
expr>0 ;                                         Pr>0 ;
f>0 ;                                            Pt>0 ;
h>0 ;                                            Q=[0,0.78] ;
h_int>0 ;                                        qair>0 ;
H_bloc=[0,0.6] ;                                 Repc>0 ;
Hel=[0,1] ;                                      rho_moy=[0.5,1.5] ;
K>0 ;                                            T_max>0 ;
l_bloc=[0,3] ;                                   Tair=[273,303] ;
L_bloc=[0,3] ;                                   Tair_ent>0 ;
l_eq>0 ;                                         Tair_sort>0 ;
l_moy=[0.01,0.04] ;                              U=[100,250] ;
l_neg>0 ;                                        x=[0,1] ;

(* Modele de milieu exterieur de l'air *)
rho_air(tair):=1.188*293/tair ;
const Cpmoy=1006 ;
l_air(tair):=7.57*10^-5*(tair-273)+0.0242 ;
      mu_air(tair):=(0.0046*(tair-273)+1.7176)*10^-5 ;
(* ********************** Flux d'energie thermique ********************** *)
(* Modele d'interaction pour le flux d'energie thermique *)
      Tair_ent=Tair ;
```

```
(* Modele de composant du bloc electrique pour le flux d'energie thermique *)
T_max=Pt*Lf^2/(8*l_eq)+Pt*Lf/(2*K)+Tair_sort-Pt*Lf*lf*Hel/(qair*Cpmoy) ;
T_max<363 ;
l_eq=(n_pos*l_pos*e_pos+n_neg*l_neg*e_neg+n_sep*(l_sol*x+l_sep*(1-
x))*e_sep)/(n_pos*e_pos+n_neg*e_neg+n_sep*e_sep) ;
dT_max=Tair_sort-Tair_ent-Pt*Lf*lf*Hel/(qair*Cpmoy) ;
dT_air_max=Tair_sort-Tair_ent ;
Tair_sort-Tair_ent=Pt*Lf*nel_L*nf*lf*Hel/(qair*Cpmoy) ;
      qair=rho_air(Tair)*Q/((nel_l+1)*nel_H) ;

      K=1/(1/(h)+1/h_int+ep/l_p) ;


deq=1.265*((Hel^3)*(esp^3)/(Hel+esp))^0.2 ;
Repc=(deq*qair/(esp*Hel))/mu_moy ;
Nu=2*esp*h/l_moy ;
      Pr=mu_moy*Cpmoy/l_moy ;

l_moy=(l_air(Tair_ent)+l_air(Tair_sort))/2 ;
mu_moy=(mu_air(Tair_ent)+mu_air(Tair_sort))/2 ;
      rho_moy=(rho_air(Tair_ent)+rho_air(Tair_sort))/2 ;

(* Correlations Nusselt, Reynolds, Prandtl *)
Nu1(re,pr):=7.54 ;
Nu2(re,pr):=1.86*(re*pr*(2*esp/Lf))^0.33 ;
Nu3(re,pr):=0.116*(re^0.66-125)*pr^0.33 ;
      Nu4(re,pr):=0.023*re^0.8*pr^0.33 ;

Repc<900                  ~> Nu=Nu1(Repc,Pr) ;
Repc>=900 and Repc<1100   ~> Nu=((Nu2(Repc,Pr)-Nu1(Repc,Pr))*(Repc-900)/(1100-900))+Nu1(Repc,Pr) ;
Repc>=1100 and Repc<1900  ~> Nu=Nu2(Repc,Pr) ;
Repc>=1900 and Repc<2300  ~> Nu=((Nu3(Repc,Pr)-Nu2(Repc,Pr))*(Repc-1900)/(2300-1900))+Nu2(Repc,Pr) ;
Repc>=2300 and Repc<8000  ~> Nu=Nu3(Repc,Pr) ;
Repc>=8000 and Repc<10000 ~> Nu=((Nu4(Repc,Pr)-Nu3(Repc,Pr))*(Repc-8000)/(10000-8000))+Nu3(Repc,Pr) ;
Repc>=10000               ~> Nu=Nu4(Repc,Pr) ;


(* ********************** Flux d'energie mecanique (air) ********************** *)
(* Modele de composant du ventilateur pour le flux d'energie mecanique *)
ventil in {doma270203} ~> DP_bat+DP_filt=-4.031e-027*(Q*3600)^9+4.667e-023*(Q*3600)^8-2.272e-
019*(Q*3600)^7+6.208e-016*(Q*3600)^6-1.079e-012*(Q*3600)^5+1.243e-009*(Q*3600)^4-9.021e-
007*(Q*3600)^3+0.0004157*(Q*3600)^2-0.2479*(Q*3600)+646.4 and Q<=0.7778 ;
ventil in {K_KV_315L}  ~> DP_bat+DP_filt=-5.135e-6*(Q*3600)^2-0.4105*(Q*3600)+702.3 and Q<=0.46 ;
ventil in {K_KV_315M}  ~> DP_bat+DP_filt=-1.287e-008*(Q*3600)^3-5.615e-005*(Q*3600)^2-
0.3329*(Q*3600)+578.2 and Q<=0.37 ;
ventil in {K_KV_200M}  ~> DP_bat+DP_filt=-2.423e+005*Q^5+1.375e+005*Q^4-2.176e+004*Q^3-2668*Q^2-
1143*Q+403.7 and Q<=0.215 ;

(* Modele de composant du filtre pour le flux d'energie mecanique *)
      DP_filt = 130;
```

```
(* Modele de composant du bloc electrique pour le flux d'energie mecanique *)
DP_bat=0.5*((qair/(esp*Hel))^2)*(1.03/rho_air(Tair_ent)+2*(1/rho_air(Tair_sort)-
1/rho_air(Tair_ent))+4*f*nel_L*Lel/(rho_moy*deq)+0.5/rho_air(Tair_sort));
Lel=nf*lf ;

(* Correlations Reynolds, coefficient de frottement *)
Repc<2000 ~> f=16/Repc;
expr=(asp/deq)*Repc*(4*0.025)^0.5 ;
expr >= 3.6 and expr <= 10 and Repc>2000 ~> f=0.25*(-0.8+2*ln(Repc*(4*f)^0.5)/ln(10))^(-2) ;
expr > 10 and expr <= 20 and Repc>2000 ~> f=0.25*(0.068+1.13*ln(Repc*(4*f)^0.5)/ln(10)-
0.87*ln(asp/deq)/ln(10))^(-2) ;
expr > 20 and expr <= 40 and Repc>2000 ~> f=0.25*(1.538-2*ln(asp/deq)/ln(10))^(-2) ;
expr > 40 and expr <= 191.2 and Repc>2000 ~> f=0.25*(2.471-0.588*ln(Repc*(4*f)^0.5)/ln(10)-
2.588*ln(asp/deq)/ln(10))^(-2) ;
expr > 191.2 and Repc>2000 ~> f=0.25*(1.138-2*ln(asp/deq)/ln(10))^(-2) ;

(* ********************** Flux d'energie electrique ********************** *)
const u0=1.2 ;
nel_H*nel_l*nel_L*nf*u0=U ;

(* encombrement *)
L_bloc=nel_L*Lel ;
l_bloc=nel_l*(Lf+2*ep)+(nel_l+1)*esp ;
H_bloc=nel_H*Hel ;
```

Modèle adapté du niveau 2

```
(*********************************************************************************************)
(* Modele adapte de conception preliminaire d'un systeme de refroidissement de batterie *)
(*********************************************************************************************)
(* Declaration et domaines de variation des variables *)
nel_H : int ; nel_H=[0,100] ;                          nel_L : int ; nel_L=[0,100] ;
nel_l : int ; nel_l=[0,100] ;                          nf : int ; nf=[0,100] ;

(* variables enumerees symboliques *)
ventil : enumS ; ventil in {doma270203 , K_KV_315L , K_KV_315M} ;
(* variables reelles *)
asp=[0,0.01] ;                                         Nu>0 ;
deq>0 ;                                                NUT>0 ;
dTair>0 ;                                              Pr>0 ;
DP_bat=[0,10000] ;                                     Pt>0 ;
eff=[0,1] ;                                            Q=[0,0.78] ;
esp=[0,0.1] ;                                          qair >0 ;
expr>0 ;                                               Repc>0 ;
f>0 ;                                                  rho_moy=[0.5,1.5] ;
h>0 ;                                                  Tair=[273,303] ;
Hel=[0,0.5] ;                                          Tair_ent>0 ;
l_moy=[0.01,0.04] ;                                    Tair_sort>0 ;
lel=[0,0.5] ;                                          Tmax>0 ;
Lel=[0,0.5] ;                                          U=[100,250] ;
mu_moy=[1.5e-5,2.5e-5] ;
```

```
(* Modele de milieu exterieur de l'air *)
rho_air(tair):=1.188*293/tair ;
const Cpmoy=1006 ;
l_air(tair):=7.57*10^-5*(tair-273)+0.0242 ;
mu_air(tair):=(0.0046*(tair-273)+1.7176)*10^-5 ;
(* ********************** Flux d'energie thermique ********************** *)
(* Modele de composant du bloc electrique pour le flux d'energie thermique  *)
eff=1-exp(-NUT) ;
NUT=(2*h*Hel*Lel)/(qair*Cpmoy) ;
dTair=(Pt*lel*Lel*Hel)/(qair*Cpmoy) ;
Tair_sort=Tair_ent+nel_L*dTair ;
dTair_max=Tair_sort-Tair_ent ;
qair=rho_air(Tair)*Q/((nel_l+1)*nel_H) ;
deq=1.265*((Hel^3)*(esp^3)/(Hel+esp))^0.2 ;
Repc=(deq*qair/(esp*Hel))/mu_moy ;
Nu=2*esp*h/l_moy ;
Pr=mu_moy*Cpmoy/l_moy ;

l_moy=(l_air(Tair_ent)+l_air(Tair_sort))/2 ;
mu_moy=(mu_air(Tair_ent)+mu_air(Tair_sort))/2 ;
rho_moy=(rho_air(Tair_ent)+rho_air(Tair_sort))/2 ;

Tmax=Tair_ent+(nel_L-1)*dTair+dTair/eff ;
dTmax=(nel_L-1)*dTair ;
(* Correlations Nusselt, Reynolds, Prandtl *)
Nu1(re,pr):=7.54 ;
Nu2(re,pr):=1.86*(re*pr*(2*esp/Lel))^0.33 ;
Nu3(re,pr):=0.116*(re^0.66-125)*pr^0.33 ;
Nu4(re,pr):=0.023*re^0.8*pr^0.33 ;

Repc<900                  ~> Nu=Nu1(Repc,Pr) ;
Repc>=900 and Repc<1100   ~> Nu=((Nu2(Repc,Pr)-Nu1(Repc,Pr))*(Repc-900)/(1100-900))+Nu1(Repc,Pr) ;
Repc>=1100 and Repc<1900  ~> Nu=Nu2(Repc,Pr) ;
Repc>=1900 and Repc<2300  ~> Nu=((Nu3(Repc,Pr)-Nu2(Repc,Pr))*(Repc-1900)/(2300-1900))+Nu2(Repc,Pr) ;
Repc>=2300 and Repc<8000  ~> Nu=Nu3(Repc,Pr) ;
Repc>=8000 and Repc<10000 ~> Nu=((Nu4(Repc,Pr)-Nu3(Repc,Pr))*(Repc-8000)/(10000-8000))+Nu3(Repc,Pr) ;
Repc>=10000               ~> Nu=Nu4(Repc,Pr) ;

(* Modele d'interaction pour le flux d'energie thermique *)
Tair_ent=Tair ;

(* ********************** Flux d'energie mecanique (air) ********************** *)
(* Modele de composant du ventilateur pour le flux d'energie mecanique *)
ventil     in     {doma270203}     ~>     DP_bat+130=-4.031e-027*(Q*3600)^9+4.667e-023*(Q*3600)^8-2.272e-
019*(Q*3600)^7+6.208e-016*(Q*3600)^6-1.079e-012*(Q*3600)^5+1.243e-009*(Q*3600)^4-9.021e-
007*(Q*3600)^3+0.0004157*(Q*3600)^2-0.2479*(Q*3600)+646.4 and Q<=0.7778 ;
ventil in {K_KV_315L}  ~> DP_bat+130=-5.135e-6*(Q*3600)^2-0.4105*(Q*3600)+702.3 and Q<=0.46 ;
ventil in {K_KV_315M}  ~> DP_bat+130=-1.287e-008*(Q*3600)^3-5.615e-005*(Q*3600)^2-0.3329*(Q*3600)+578.2 and
Q<=0.37 ;
ventil  in  {K_KV_200M}   ~>  DP_bat+130=-2.423e+005*Q^5+1.375e+005*Q^4-2.176e+004*Q^3-2668*Q^2-1143*Q+403.7
and Q<=0.215 ;
```

```
(* Modele de composant du filtre pour le flux d'energie mecanique *)
DP_filt finale = 130 ;

(* Modele de composant du bloc electrique pour le flux d'energie mecanique *)
DP_bat=0.5*((qair/(esp*Hel))^2)*(1.03/rho_air(Tair_ent)+2*(1/rho_air(Tair_sort)-
1/rho_air(Tair_ent))+4*f*nel_L*Lel/(rho_moy*deq)+0.5/rho_air(Tair_sort));

(* Correlations Reynolds, coefficient de frottement *)
Repc<2000 ~> f=16/Repc;
expr=(asp/deq)*Repc*(4*0.025)^0.5 ;
expr >= 3.6 and expr <= 10 and Repc>2000 ~> f=0.25*(-0.8+2*ln(Repc*(4*f)^0.5)/ln(10))^(-2) ;
expr > 10 and expr <= 20 and Repc>2000 ~> f=0.25*(0.068+1.13*ln(Repc*(4*f)^0.5)/ln(10)-
0.87*ln(asp/deq)/ln(10))^(-2) ;
expr > 20 and expr <= 40 and Repc>2000 ~> f=0.25*(1.538-2*ln(asp/deq)/ln(10))^(-2) ;
expr > 40 and expr <= 191.2 and Repc>2000 ~> f=0.25*(2.471-0.588*ln(Repc*(4*f)^0.5)/ln(10)-
2.588*ln(asp/deq)/ln(10))^(-2) ;
expr > 191.2 and Repc>2000 ~> f=0.25*(1.138-2*ln(asp/deq)/ln(10))^(-2) ;

(* ********************** Flux d'energie electrique ********************** *)
const u0=1.2 ;
nel_H*nel_l*nel_L*nf*u0=U ;

(* encombrement *)
L_bloc=nel_L*Lel ;
l_bloc=nel_l*(lel)+(nel_l+1)*esp ;
H_bloc=nel_H*Hel ;
```

FORMALISATION et QUALIFICATION de MODÈLES par CONTRAINTES en CONCEPTION PRÉLIMINAIRE

Résumé :

La conception architecturale constitue une étape complexe du développement d'un produit, car elle implique : (i) une prise de décision dans un contexte où les données du problème sont mal définies ou imprécises, (ii) une exploration de l'espace des solutions qui doit rester aussi large que possible, (iii) des choix de conception basés sur des variables continues ou discrètes, et (iv) une optimisation multidisciplinaire. Ainsi, les modèles de simulation classiquement utilisés en conception sont souvent mal adaptés à une réelle prise de décision : certains modèles sont trop simples, les choix sont alors entachés d'erreur de modélisation, d'autres sont trop spécialisés et certaines solutions risquent d'être ignorées.

Nous proposons dans cette étude une approche de la formalisation de modèles plus adaptée à la prise de décision en conception architecturale. Cette méthodologie vise à obtenir des modèles à la fois parcimonieux et exacts. Ainsi, les modèles sont plus faciles à exploiter en conception préliminaire et cohérents avec les attentes du concepteur.

La méthode développée repose sur : (i) une approche globale basée sur la décomposition fonctionnelle pour conserver une cohérence entre les modèles des différents composants, (ii) l'utilisation de quatre critères de qualification des modèles permettant de s'assurer de leur adéquation avec les objectifs de la conception préliminaire, (iii) l'utilisation des techniques d'adaptation de modèles, permettant de faire des choix de conception à l'aide de solveurs de Problèmes par Satisfaction de Contraintes (PSC).

Les quatre critères de qualification utilisés sont : (i) la parcimonie du modèle, liée au nombre minimal de variables et d'équations décrivant correctement le comportement du système, (ii) l'exactitude du modèle, estimant l'adéquation entre les résultats du modèle et des résultats issus d'un modèle de référence, (iii) la précision du modèle, évaluant l'étendue du domaine de variation de chaque variable, due à un manque de connaissance ou à une incertitude et (iv) la spécialisation du modèle, qui est une mesure de la restriction du domaine d'application du modèle, relativement à la quantité d'information introduite dans le modèle. Les quatre critères retenus sont pertinents de la conception préliminaire dans la mesure où : la parcimonie assure la simplicité du modèle, la spécialisation contribue à définir l'étendue du domaine d'application du modèle, et donc les limites de l'espace de conception, enfin, l'exactitude et la précision donnent une mesure de la fidélité du modèle à la réalité. Utilisés au cours de la méthodologie proposée, ces critères constituent un moyen de contrôle des modèles jusqu'à atteindre la forme souhaitée.

Enfin, cette méthodologie est illustrée au travers de l'exemple d'une batterie de véhicule électrique, pour lequel deux modèles de niveaux systémiques différents sont comparés.

Mots clés :

Aide à la décision, Problème par Satisfaction de Contraintes (PSC), Conception Architecturale, Qualification, Parcimonie, Exactitude, Précision, Spécialisation.

FORMALIZING and QUALIFYING MODELS for CONSTRAINT-BASED EMBODIMENT DESIGN

Abstract:

Embodiment design involves: (i) decision making while the problem's data are poorly defined and quite imprecise, (ii) design space exploration that must be kept as large as possible, (iii) choices involving both discrete and continuous variables, and (iv) multidisciplinary optimization. Consequently, classical simulation models involved in the preliminary stages of the design process are usually improper to efficient decision-making. They are either too simple or specialized to make design choices: either the choices are distorted by modelling mistakes, or some possible solutions remain undetected.

An approach is proposed to model formalization that is more consistent with decision-making in embodiment design. The methodology aims at obtaining models both parsimonious and accurate. Therefore, these models are easier to handle in preliminary design, and consistent with the designer expectations, in order to make the model treatment more efficient. The developed method involves: (i) a global approach based on functional decomposition to keep consistency between the models of the different components, (ii) the use of four criteria to qualify the models and to ensure their adequacy with the preliminary design goals, (iii) the use of model adaptation techniques to make design choices with the help of Constraint Satisfaction Problems (CSP) solvers.

The four qualification criteria are: (i) the model parsimony, related to the minimum variables and equations number that represent the system behaviour, (ii) the model accuracy, estimating the adequacy between the model results and those provided by a reference model, (iii) the model precision, evaluating the domain extent of each variable, related to a lack of knowledge or uncertainty, and (iv) the model specialization which is an estimate of the restriction of the model applicability, in relation to the amount of information used in the model. The four adopted criteria appear relevant for modelling in preliminary design since: parsimony ensures model simplicity, specialization contributes to define the model application range and thus, the design space limits, and finally, accuracy and precision provide a measurement of model fidelity. Throughout the methodology, they provide a way to control the models until they reach the expected form.

Finally, the methodology is illustrated by an example of electric vehicle battery and two models are compared for two different systemic levels.

Keywords :

Decision Support System, Constraints Satisfaction Problem (CSP), Embodiment Design, Qualification, Parsimony, Accuracy, Precision, Specialization.