



HAL
open science

Méthodologie de conception de matériaux architecturés : application au packaging de l'électronique embarquée

Paul Baracchini

► To cite this version:

Paul Baracchini. Méthodologie de conception de matériaux architecturés : application au packaging de l'électronique embarquée. Mécanique [physics]. Université de Bordeaux, 2016. Français. NNT : 2016BORD0098 . tel-01370344

HAL Id: tel-01370344

<https://theses.hal.science/tel-01370344>

Submitted on 22 Sep 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE PRÉSENTÉE
POUR OBTENIR LE GRADE DE
DOCTEUR DE
L'UNIVERSITÉ DE BORDEAUX

ÉCOLE DOCTORALE DES SCIENCES POUR L'INGENIEUR
SPÉCIALITÉ Mécanique

Par Paul BARACCHINI

Méthodologie de conception de matériaux architecturés
Application au packaging de l'électronique embarquée

Sous la direction de : Hervé WARGNIER

Soutenue le 18 juillet 2016

Membres du jury :

| | | |
|--------------------------|--|---------------|
| M. BRECHET Yves | Professeur des Universités, INP Grenoble | Président |
| M. ALDANONDO Michel | Professeur des Universités, Ecole des mines d'Albi | Rapporteur |
| M. DENDIVIEL Rémy | Professeur des Universités, INP Grenoble | Rapporteur |
| Mme GUILLEBAUD Claire | Maître de Conférences, Université de Bordeaux | Examineur |
| M. KROMM François-Xavier | Maître de Conférences, Université de Bordeaux | Examineur |
| M. WARGNIER Hervé | Professeur des Universités, Université de Bordeaux | Examineur |
| M. SAILLARD Audric | Industriel, Airbus Group Innovations | Membre Invité |

Titre : Méthodologie de conception de matériaux architecturés : Application au packaging de l'électronique embarquée

Résumé : Le processus de conception d'un multimatériau impliquant à la fois l'architecture et les matériaux représente une tâche difficile en raison du nombre élevé de configurations possibles. Ce processus oblige les concepteurs d'une part à développer des approches nouvelles, mais aussi à développer de nouveaux outils. Ainsi ce travail propose une nouvelle méthode pour la conception de matériaux architecturés. Un matériau architecturé, ou multimatériau, peut être défini par son architecture, ses matériaux constitutifs associés à leurs fractions volumiques et la nature de leurs interfaces. La conception d'un multimatériau est basée sur le choix de nombreux paramètres aussi bien quantitatifs que qualitatifs. Dans ce travail, la méthode de conception proposée permet une sélection simultanée des architectures et des matériaux. Celle-ci est axée autour de l'association d'une base de données d'architectures élémentaires et d'une base de données de matériaux. La recherche de solutions est basée sur une méthode hybride utilisant un algorithme génétique et un algorithme de programmation sous contraintes. La méthode hybride permet la définition de solutions intégrant des paramètres géométriques optimisés en réponse aux contraintes du cahier des charges. Ce travail a été réalisé au sein du projet MUJU (Mutimaterial mUltiphysics JUnction) financé par l'Agence Nationale de la Recherche. Le travail développé a ainsi été appliqué à la conception de packaging de l'électronique embarquée. Actuellement fabriqué en alliage métallique, ce packaging utilisé dans l'aéronautique doit satisfaire à la fois des contraintes thermiques, mécaniques et électriques. Les solutions obtenues ont permis un gain de masse de 20 à 40% tout en assurant des performances équivalentes.

Mots clés : Matériaux architecturés, multimatériaux, optimisation

Title: Design methodology of architected materials: Application to the heat sink embedded electronic packaging

Abstract: The design process involving both the architectures and the materials represents an hard task mainly because of the high number of possible configurations. This issue requires the development of new approaches and new tools. In this study, a new strategy for the design of architected materials is proposed. An architected material, or multimaterial, can be defined by its architecture, its components and their volume fractions, and the nature of the interface between them. The design of a multimaterial is based on the analysis of numerous quantitative and qualitative parameters. In this study, a multimaterial design method allowing a simultaneous selection of architectures and materials was developed. This work deals with the association of a database of elementary architectures and a database of materials. The search of solutions is based on an hybrid method using genetic algorithm and constraint programming algorithm. This hybrid method allowed the definition of solutions, with optimal geometrical parameters in answer to the specifications requirements. This study was carried out within the MUJU project (Mutimaterial mUltiphysics JUction) framework supported by the National Research Agency. The developed method was applied to the design of heat sink in embedded electronic packaging for aeronautic. Currently made of metallic alloy, the packaging must simultaneously satisfy thermal, mechanical and electrical constraint. The achieved solutions allowed a weight saving lies in the range 20 to 40% while keeping the same performance.

Keywords: Architected materials, multimaterials, optimization

Institut de Mécanique et d'Ingénierie (I2M)

Laboratoire I2M, Université de Bordeaux, UMR5295, F-33400 Talence, France

REMERCIEMENTS

J'adresse tout d'abord mes remerciements aux rapporteurs, Michel Aldanondo et Rémy Dendiviel pour avoir accepté de relire ce manuscrit. Mes remerciements s'adressent ensuite à Yves Bréchet pour avoir pris le temps d'assurer la présidence du jury ainsi qu'à Audric Saillard pour sa participation.

Je remercie sincèrement Hervé Wargnier, directeur de la thèse, pour son écoute, ses conseils et pour la confiance qu'il m'a témoignée en me permettant de réaliser ce travail. J'adresse toute ma reconnaissance à mes deux encadrants pour leur accompagnement tout au long de cette expérience. Je les remercie sincèrement pour leur investissements personnels qui ont permis d'orienter la thèse dans le bon sens.

J'ai lu dans un manuscrit qu'un travail de thèse était loin de n'être qu'un travail personnel et je suis assurément d'accord avec l'auteur. Pour cette raison, je voudrais le remercier pour les conseils avisés qu'il a su m'apporter ces trois dernières années.

Je tiens à remercier chaleureusement mes co-bureaux Momo, Zizi, Damien et Eileen. Nos échanges autour de dissensions religieuses, culturelles ou même capillaires m'ont apporté le soutien nécessaire à l'aboutissement de ce travail. Une spéciale dédicace à Julie et son rire communicatif, qui est devenue, force de petits déjeuners matinaux, une très chouette amie sur qui j'ai pu compter. Je remercie également l'ensemble des personnes du site IUT I2M. Cette thèse a été source de discussions sur la littérature (Merci Christophe), sur la poésie (Merci JC), sur le sport (Merci Stéphane) ou encore sur la beaugossitude (Merci Matthieu) dans une salle de repos aseptisée (Merci Alain) autour d'un bon café, ou tout du moins, autour d'un café (Merci Jim). Merci particulièrement à Catherine pour sa bienveillance.

Je remercie mes amis à commencer par les amis Rochelais. Un remerciement particulier à Clément, un ami hors norme, pour m'avoir apporté un soutien sans faille et cela dans bien des situations. Je remercie également chaudement mes amis Bordelais à commencer par Sophie, pour la personne qu'elle est, pour sa générosité et sa bienveillance. Je remercie enfin Nono pour être Nono, un ami formidable.

Je tiens à remercier et à exprimer ma profonde gratitude à mes parents MHB et Dr

Baracchini Sr. pour leur patience et leur amour inconditionnel. Je remercie ensuite mes trois fantastiques sœurs Anne, Claire et Lise ainsi que mon (beau-)frère Antoine pour leur amour et leur soutien constant dans les moments difficiles.

Enfin, mes dernières pensées vont à Marie que je remercie sincèrement pour son amour, sa gentillesse et sa patience, liste non exhaustive des nombreuses qualités d'une femme exceptionnelle.

TABLE DES MATIERES

| | |
|---|-----------|
| Introduction générale | 13 |
| I Elaboration d'une démarche de conception | 17 |
| I.1 Généralités sur le processus de conception..... | 19 |
| I.1.1 Les différentes classes de conception | 19 |
| I.1.2 Les méthodes de sélection et de procédés | 20 |
| I.2 Du matériau au multimatériau | 23 |
| I.2.1 Qu'est ce qu'un multimatériau ? | 23 |
| I.2.2 Pourquoi s'orienter vers une solution architecturée ? | 24 |
| I.3 Approche de la conception de multimatériau | 26 |
| I.3.1 Retour sur des méthodologies proposées | 27 |
| I.3.1.1 Adaptation des méthodes de sélection de matériaux | 27 |
| I.3.1.2 La recherche de morphologies | 30 |
| I.3.1.3 Synthèse..... | 32 |
| I.3.2 Structuration de la base de données d'architecture : démarche et exemples | 35 |
| I.3.3 Cadre de la méthodologie développée | 46 |
| I.3.3.1 Stratégie de subdivision | 47 |
| I.3.3.2 Construction des bases de données de motifs géométriques et de matériaux..... | 48 |
| I.3.4 Une évaluation multi-échelle des propriétés du multimatériau..... | 51 |
| I.3.4.1 Macro-échelle : Homogénéisation des propriétés du multimatériau | 52 |
| I.3.4.2 Mésos-échelle : Homogénéisation des propriétés des motifs du multimatériau..... | 52 |
| I.4 Conclusion..... | 55 |

| | |
|--|-----------|
| II Présentation de l'application industrielle | 57 |
| II.1 Introduction | 59 |
| II.1.1 Les enjeux des packagings d'électronique embarquée | 59 |
| II.1.2 Quelques exemples de développement de packaging | 60 |
| II.2 Présentation de l'application industrielle..... | 62 |
| II.2.1 Déclinaison des exigences générales | 64 |
| II.2.2 Déclinaison des fonctions principales..... | 64 |
| II.2.2.1 Déclinaison de la fonction thermique..... | 65 |
| II.2.2.2 Déclinaison de la fonction mécanique..... | 67 |
| II.2.2.3 Déclinaison de la fonction électromagnétique | 68 |
| II.3 Analyse et modélisation du capot supérieur..... | 69 |
| II.3.1 Modélisation des phénomènes thermiques | 70 |
| II.3.1.1 Modélisation des picots..... | 71 |
| II.3.1.2 Modélisation des bossages et des bords d'interface glissières | 75 |
| II.3.2 Modélisation des phénomènes vibratoires et électriques..... | 80 |
| II.3.2.1 Modélisations des picots | 80 |
| II.3.2.2 Modélisation des bossages et des bords d'interface glissières | 83 |
| II.3.3 Implémentation du modèle numérique | 85 |
| II.4 Conclusion..... | 89 |
| III La sélection d'un couple architecture/matériaux | 91 |
| III.1 Le choix d'un outil de sélection | 93 |
| III.1.1 Les méthodes de résolution..... | 93 |
| III.1.1.1 Les méthodes déterministes..... | 94 |
| III.1.1.2 Les méthodes stochastiques..... | 95 |
| III.1.1.3 Le choix d'une méthode de résolution | 95 |

| | |
|--|------------|
| III.1.2 Les algorithmes génétiques..... | 98 |
| III.1.2.1 Principe de fonctionnement..... | 98 |
| III.1.2.2 Les opérateurs génétiques | 100 |
| III.1.2.3 Paramètres génétiques | 103 |
| III.1.3 Définition d'un cas d'étude préliminaire..... | 103 |
| III.1.3.1 Objectif de conception..... | 104 |
| III.1.3.2 Astreinte thermique..... | 104 |
| III.1.3.3 Astreinte mécanique | 105 |
| III.1.3.4 Astreinte électrique | 106 |
| III.2 Application au problème de conception du multimatériau..... | 107 |
| III.2.1 Codage des individus | 107 |
| III.2.2 Etude de dépendance des paramètres génétiques | 108 |
| III.2.2.1 Démarche utilisée dans l'étude paramétrique | 109 |
| III.2.2.2 Paramètres étudiés | 111 |
| III.2.2.3 Analyse des résultats | 111 |
| III.3 La proposition de solutions | 116 |
| III.3.1 Résolution du cas d'étude préliminaire..... | 116 |
| III.3.2 Résolution du cas d'étude industriel | 124 |
| III.4 Conclusion | 128 |
| IV Proposition d'une démarche hybride d'exploration..... | 131 |
| IV.1 Hybridation de l'algorithme génétique | 133 |
| IV.1.1 Les stratégies d'hybridation | 133 |
| IV.1.1.1 Hybridation d'une métaheuristique avec une métaheuristique..... | 133 |
| IV.1.1.2 Hybridation d'une métaheuristique avec une méthode exacte..... | 135 |
| IV.1.1.3 Le choix d'une stratégie d'hybridation | 136 |

| | |
|--|------------|
| IV.1.2 Les méthodes exactes..... | 137 |
| IV.1.2.1 Quelques méthodes déterministes usuelles | 138 |
| IV.1.2.2 Le choix d'un algorithme déterministe | 140 |
| IV.1.3 Application de la stratégie d'hybridation..... | 142 |
| IV.1.3.1 Application au cas d'étude préliminaire | 142 |
| IV.1.3.2 Application au cas d'étude industriel..... | 152 |
| IV.2 Démarche d'exploitation de l'espace de recherche | 160 |
| IV.2.1 La démarche proposée | 160 |
| IV.2.1.1 Principe de la démarche..... | 161 |
| IV.2.1.2 Organigramme général | 162 |
| IV.2.2 Les critères de diminution de l'espace de recherche | 163 |
| IV.2.2.1 Des critères technologiques..... | 163 |
| IV.2.2.2 Un critère d'exclusion d'un matériau ou d'un motif..... | 164 |
| IV.2.2.3 Un critère d'exclusion du couple motif/matériau(x) de l'une des couches du multimatériau basé sur un indicateur statistique..... | 168 |
| IV.2.2.4 Un critère architecture/matériaux..... | 173 |
| IV.3 Conclusion | 174 |
| Conclusion générale et perspectives | 177 |
| Références bibliographiques | 183 |
| Annexes | 193 |

INTRODUCTION GENERALE

L'amélioration des performances d'une pièce, la diminution des coûts de production ou encore l'intégration de nouvelles fonctions dans le matériau sont autant de raisons qui poussent le concepteur à des innovations en matière de conception. Dans le cadre de la conception originale ou routinière, des méthodes et outils ont été développés ces dernières décennies dans le but de guider le concepteur vers le choix optimal d'un matériau.

Seulement, face à des cahiers des charges du matériau de plus en plus complexes, il peut arriver qu'aucun matériau ne réponde à toutes les exigences. De plus en plus confronté à ces situations, le concepteur dispose désormais d'outils permettant d'analyser les raisons de l'échec provenant par exemple d'une multiplicité de requêtes parfois contradictoires ou encore de niveaux d'exigences trop élevés.

Ces problématiques ont favorisé le développement des solutions multimatériaux définies par l'association d'une architecture et de matériaux. Les matériaux architecturés sont désormais présents dans de nombreux secteurs industriels et leur utilisation croissante a favorisé leur développement.

Vers la proposition d'une démarche générale de conception d'un matériau architecturé

L'architecture du multimatériau est caractérisée par la coexistence de différentes échelles, observables et définissables. La notion d'architecture intervient donc à différents niveaux dans la construction d'un multimatériau. A cette architecture, définie par des paramètres géométriques, sont également associés des matériaux constitutifs. Ainsi, la multiplicité des paramètres de conception qu'offrent les multimatériaux a engendré le besoin de développer des méthodes spécifiques de conception.

Des prises de décisions dans des espaces de recherche immensément vastes ont imposé aux concepteurs de figer certains paramètres décisionnels en amont de l'étude. En effet, fixer préalablement l'architecture ou les constituants du multimatériau permet de réduire les espaces de recherche. Dans ce cadre, le développement d'outils s'est appuyé sur

la dissociation du couple architecture/matériaux tout en garantissant une sélection optimale d'architectures ou de matériaux.

L'objectif de ce manuscrit est la proposition d'une méthode de conception de multimatériaux. La démarche développée devra permettre une sélection couplée et simultanée de l'architecture et des constituants du multimatériau. Basée sur une stratégie hybride de recherche de solutions multimatériaux, l'approche de conception proposera une optimisation des paramètres qui définissent les solutions architecturées.

Application de la démarche à la conception d'un packaging d'une carte électronique embarquée

Les équipements électroniques embarqués sont présents en nombre croissant dans les avions. L'évolution des techniques de packaging est étroitement liée à la constante évolution de la puissance et de la complexité des circuits électroniques. Le packaging et la gestion de la dissipation thermique de ces cartes électroniques embarquées sont devenus des enjeux majeurs (augmentation des niveaux de puissance des composants électroniques, miniaturisation des dispositifs...). Ces enjeux de compétitivité orientent les nouvelles solutions de packaging vers des solutions multimatériaux.

De nombreuses fonctions supplémentaires sont exigées lors de la conception de ces nouveaux matériaux : protection contre les chocs, résistance aux vibrations, dissipation thermique, blindage électromagnétique...

Ce travail de recherche a été réalisé dans le cadre du projet ANR MUJU (Mutimaterial Multiphysics Junction). L'enjeu de ce projet est le développement de solutions matériau permettant un allègement des packagings d'électronique utilisés pour l'aéronautique. La conception optimisée de multimatériaux structurés est une perspective prometteuse pour répondre aux besoins de performances multiphysiques des pièces considérées.

La démarche de conception développée dans ce manuscrit appliquée à l'ensemble qui constitue le packaging d'électronique embarquée doit permettre la proposition de solutions multimatériaux permettant un gain de masse d'au moins 20%.

Organisation du manuscrit

Le premier chapitre de ce manuscrit va être dédié à la mise en place du cadre et

des outils nécessaires au fondement de la démarche proposée. Un retour sur les méthodes spécifiques de conception permettra une analyse des outils existants tandis que la proposition d'une structuration de l'architecture d'un multimatériau à ses différentes échelles permettra de définir le cadre de travail considéré.

La démarche de conception développée dans ce manuscrit est appliquée au cahier des charges d'une pièce de packaging de l'électronique embarquée dans l'aéronautique. Le second chapitre se concentrera donc sur la pièce utilisée comme cas d'étude. La déclinaison du cahier des charges permettra une meilleure compréhension des difficultés liées à la conception de la pièce.

Le troisième chapitre de ce manuscrit portera sur le choix d'un outil permettant une sélection simultanée d'un couple architecture/matériaux au sein de l'espace de recherche. L'application de l'algorithme retenu permettra la proposition de solutions en réponse au cahier des charges établi.

A travers une hybridation de l'algorithme choisi dans le chapitre précédent, le dernier chapitre de ce manuscrit sera consacré à la mise en place d'une démarche générale itérative basée sur l'association d'explorations à la fois globales et locales de l'espace de recherche. A cette démarche seront associés des indicateurs permettant de travailler sur la trajectoire empruntée par l'algorithme dans l'espace de recherche afin de proposer des solutions variées en réponse au même cahier des charges.

CHAPITRE I

ELABORATION D'UNE DEMARCHE DE CONCEPTION

Dans son activité, le concepteur doit désormais faire des choix parmi un nombre important de paramètres de conception aussi bien physiques que géométriques, aussi bien continus que discrets. Basées sur les démarches classiques de sélection des matériaux, les méthodologies de conception de multimatériaux développées ont permis de définir les raisons qui poussent les concepteurs à se tourner vers des solutions architecturées. Ces démarches de conception ont aussi montré la difficulté liée à la coexistence de différentes échelles au sein d'un multimatériau ainsi que la difficulté de s'orienter dans l'hyperchoix qu'offrent les solutions multimatériaux. L'objectif de ce chapitre est d'effectuer des premiers choix sur le type d'approche à adopter dans mise en place d'une démarche de conception. Celle-ci nécessite dans un premier temps une structuration de l'architecture d'un multimatériau permettant sa qualification. Basée sur une stratégie de recherche libre au sein de bases de données, la démarche nécessite par la suite la mise en place d'une base de données d'architectures élémentaires associée à une base de données de matériaux. La base de données d'architectures élémentaires regroupera l'ensemble des modèles d'homogénéisations sélectionnés.

I ELABORATION D'UNE DEMARCHE DE CONCEPTION

| | |
|---|----|
| I.1 Généralités sur le processus de conception | 19 |
| I.1.1 Les différentes classes de conception | 19 |
| I.1.2 Les méthodes de sélection et de procédés | 20 |
| I.2 Du matériau au multimatériau | 23 |
| I.2.1 Qu'est ce qu'un multimatériau ? | 23 |
| I.2.2 Pourquoi s'orienter vers une solution architecturée ? | 24 |
| I.3 Approche de la conception de multimatériau..... | 26 |
| I.3.1 Retour sur des méthodologies proposées..... | 27 |
| I.3.2 Structuration de la base de données d'architecture : démarche et exemples | 35 |
| I.3.3 Cadre de la méthodologie développée | 46 |
| I.3.4 Une évaluation multi-échelle des propriétés du multimatériau..... | 51 |
| I.4 Conclusion..... | 55 |

I.1 Généralités sur le processus de conception

L'activité de conception est décrite de manière générale comme ayant pour objet de définir un produit offrant une fonctionnalité particulière et se conformant à certaines spécifications [GAUTHIER, 1995]. La norme NF L 00-007 définit plus précisément la conception d'un produit comme une « activité créatrice qui, partant des besoins exprimés, des moyens existants et des possibilités technologiques, aboutit à la définition d'un produit satisfaisant ces besoins et industriellement réalisable ».

Tous les processus de conception adoptent une démarche commune débutant nécessairement par la définition d'un besoin. La définition et l'expression précise de ce besoin conditionne majoritairement leur réussite. Le processus de conception se divise ensuite en plusieurs étapes qui permettent de définir progressivement un produit, affinant ses attributs à chaque étape, et resserrant peu à peu le champ des solutions. La première partie du travail consiste à établir tous les concepts qui sont susceptibles de satisfaire le cahier des charges (CdC). Ensuite, chacun des concepts trouvés doit être étudié plus précisément, de façon à évaluer ses caractéristiques élémentaires. A ce moment là, le concepteur doit effectuer un choix parmi toutes les solutions potentielles. La simulation de ces solutions, même si elle ne saurait être définitive, doit être menée de manière rigoureuse pour ne pas entraîner un mauvais choix ou l'élimination abusive de solutions. La dernière étape est enfin l'étude du comportement de la solution retenue, elle doit être la plus approfondie possible, puisqu'elle conduit à la définition du produit final.

I.1.1 Les différentes classes de conception

Une classification des différents types de conception, reprise dans le travail de Giaccobi [GIACCOBI, 2009], est proposée par Chandrasekaran [CHANDRASEKARAN, 1990] selon le degré de connaissance de l'objet étudié et le processus nécessaire à son développement. Les trois types de conception y sont définis comme routinier, innovant et créatif.

La conception routinière

Dans ce type de conception, le cahier des charges est défini et ne varie que

quantitativement. Les solutions au problème de conception routinière suivent une procédure bien définie. Les besoins sont traduits en cahier des charges, lui-même traduit en sous-problèmes préalablement déterminés. Suivant les niveaux de contraintes requis dans le cahier des charges, le concepteur aura le choix entre plusieurs alternatives prédéterminées, chacune en lien avec les différents sous problèmes identifiés.

La conception innovante

Le concepteur est ici face à un problème correctement identifié et quelques propositions de solutions peuvent être déjà établies. La conception innovante porte alors sur une amélioration de l'existant. Elle peut concerner l'amélioration de la méthode d'obtention du produit par exemple. La conception innovante fait appel à la créativité, bien que son résultat soit une nouvelle combinaison de solutions existantes.

La conception originale

La conception originale, ou conception créative, consiste à proposer une idée nouvelle, des modes de représentation nouveaux ou des démarches de résolutions nouvelles. Elle implique une découverte, une idée ou un principe de fonctionnement inédit qui conduit à la création d'un produit nouveau.

La classification des différents types de conception est un premier outil permettant d'aider le concepteur sur le choix de l'approche de conception devant être adopté en fonction du niveau d'innovation à apporter et du niveau de connaissance du cahier des charges. Indépendamment de sa nature, tout processus de conception engendre une étape pendant laquelle le concepteur doit effectuer une sélection de matériaux ou de procédés de mise en œuvre. Ainsi, différentes méthodes de choix de matériaux et de procédés ont été développées ces dernières années pour guider le concepteur dans la démarche de conception.

I.1.2 Les méthodes de sélection et de procédés

Ces méthodes reposent sur des principes de base communs [ASHBY, 2001] :

- la comparaison des différents matériaux nécessite une définition très précise du cahier des charges impliquant une identification et une définition des objectifs et des contraintes ;

- la démarche de sélection doit être itérative : itération d'un cahier des charges qui se construit au fur et à mesure que l'on avance dans la procédure ;
- le couplage entre la sélection des matériaux, la sélection du procédé et l'optimisation des géométries est essentiel.

La sélection des matériaux et des procédés s'effectue avec un degré de précision croissant au fur et à mesure de la définition du produit. Cette sélection ne peut s'opérer formellement sans une stratégie identifiable. Dans un souci de systématisation de la démarche de choix, Ashby [ASHBY, 2004] établit qu'une démarche de sélection repose sur trois points :

- la formulation des contraintes qui doivent être satisfaites par un candidat ;
- la formulation d'une métrique de performance ou d'une fonction de valeur qui permet de classer les solutions entre elles ;
- une démarche de recherche permettant d'explorer l'espace des solutions, d'identifier des candidats vérifiant les contraintes et de les classer suivant leur performance.

Ainsi, trois principales stratégies de sélection sont identifiées en fonction de la nature des informations utilisées dans la phase de recherche.

La recherche libre

Cette stratégie est basée sur l'exploitation de base de données contenant des attributs des candidats (module d'Young d'un matériau par exemple). A partir d'un cahier des charges renseignant sur les fonctions à réaliser, les contraintes qui en découlent ainsi que les objectifs à remplir, la sélection se déroule en trois phases successives [ASHBY, 2001] : la filtration, la classification et la documentation (tableau I-1).

| | Matériaux | Procédés |
|-----------------------|--|--|
| Candidats | Tous les matériaux | Tous les procédés |
| Filtration | Critères : <ul style="list-style-type: none"> ▪ Contraintes sur les propriétés physiques et économiques ▪ Compatibilités avec la forme, le procédé ou un traitement de surface | Critères : <ul style="list-style-type: none"> ▪ Contraintes sur les caractéristiques du procédé (qualité, tolérance) ▪ Compatibilités avec la forme et le matériau |
| Résultats | Sous-ensemble de tous les matériaux convenant pour la pièce | Sous-ensemble de tous les procédés capables de réaliser la pièce |
| Classification | Indices de performance | Estimation des coûts de production |
| Résultats | Liste classée des meilleurs matériaux selon leur performance | Liste classée des meilleurs procédés selon leur coût |
| Documentation | Expérience de l'entreprise, du fournisseur, fiches techniques... | Informations locales propres à l'entreprise (disponibilité du personnel, aptitude à l'investissement....) |
| Résultats | Liste classée des meilleurs matériaux pour l'application | Liste classée des meilleurs procédés pour réaliser la pièce |

tableau I-1 : Les étapes de la sélection des matériaux et des procédés selon Ashby [ASHBY, 2001]

Le questionnaire expert

Le questionnaire expert est un questionnaire élaboré à partir de l'analyse d'un comportement, guidant le concepteur à travers une série de questions pour lesquelles les réponses sont de type booléenne (oui/non) ou ouverte.

La recherche par analogie

L'emploi de la recherche par analogie est particulièrement indiqué lorsque le domaine d'application présente de fortes spécificités [LIAO, 2003]. L'intérêt majeur de cette méthode réside en l'exploitation des connaissances collectées. Cette approche nécessite un effort considérable pour recueillir les informations permettant de connaître le savoir-faire spécifique de l'entreprise. De plus, l'utilisation de cette approche n'aboutit pas toujours à de nouvelles solutions en termes de matériaux et de procédés.

I.2 Du matériau au multimatériau

L'évolution des techniques et des technologies a entraîné une augmentation des attentes du concepteur vis-à-vis du produit conçu. La nécessité de proposer des matériaux toujours plus performants pour des cahiers des charges multifonctionnels aux niveaux d'exigences toujours plus élevés a favorisé le développement des multimatériaux dont les propriétés peuvent être ajustées grâce à l'arrangement spatial des différentes phases.

I.2.1 Qu'est ce qu'un multimatériau ?

Le terme de « matériau architecturé », ou multimatériau, est désormais largement utilisé dans la littérature [BRECHET, 2013 ; DUNLOP, 2009 ; LASZCZYK, 2011 ; TRINH, 2011 ; DIRRENBARGER, 2012]. Un multimatériau peut être défini comme l'association d'un ou plusieurs matériaux agencés suivant une architecture définie à une échelle intermédiaire comprise entre le micromètre et le mètre (figure I-1).

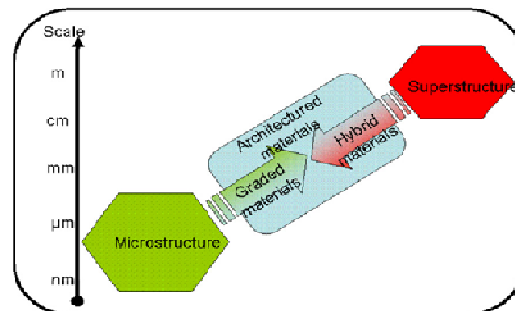


figure I-1 : Représentation de la définition d'un multimatériau selon Bouaziz et al. [BOUAZIZ, 2008]

Cette définition est assimilable à la définition d'un multimatériau déjà proposée par Wargnier [WARGNIER, 2010] qui synthétise les définitions d'un multimatériau déjà introduites dans les travaux de Kromm [KROMM, 2002], Castillo [CASTILLO, 2004] et Etchart [ETCHART, 2007] : « un multimatériau est l'association d'un ou plusieurs matériaux disposés suivant une morphologie prédéfinie telle qu'un volume élémentaire représentatif ait au moins une dimension très petite devant les dimensions de la pièce qu'il compose ». Cette définition d'un multimatériau est proche de la définition d'un matériau hybride proposée par Ashby et Bréchet [ASHBY, 2003] si l'on considère qu'un gaz ou un

fluide puissent être un des constituants.

Ainsi, la conception d'un multimatériau impose au concepteur de faire des choix parmi un nombre plus importants de paramètres, paramètres aussi bien continus que discrets, tels que :

- les matériaux constitutifs ;
- les fractions volumiques de chaque constituant ;
- l'architecture, c'est-à-dire l'arrangement spatial des constituants ;
- la nature et les propriétés des interfaces entre les constituants.

I.2.2 Pourquoi s'orienter vers une solution architecturée ?

Les espaces vides sur les cartes graphiques matériaux (figure I-2) démontrent la difficulté des matériaux monolithiques à répondre à des requêtes contradictoires ou à des niveaux d'exigences élevés.

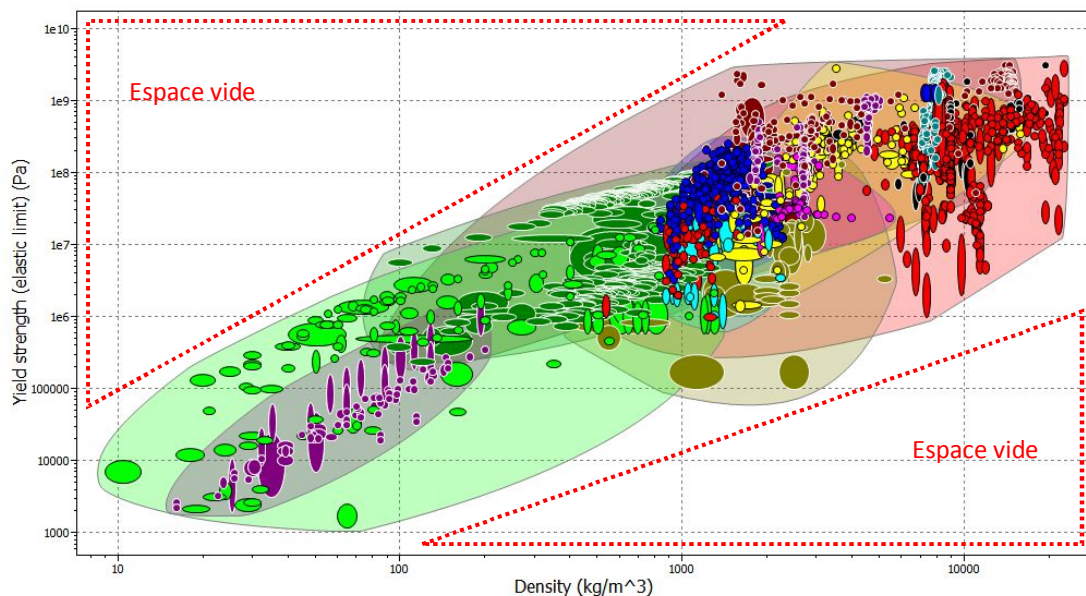


figure I-2 : Les espaces vides sur une carte de propriétés des matériaux, logiciel CES[®]

La conception d'un multimatériau peut permettre d'atteindre des solutions situées dans ces espaces vides. La connaissance d'un modèle d'homogénéisation, représenté par une courbe reliant un matériau A à un matériau B, permet d'évaluer les propriétés de matériaux se situant dans de tels espaces. Par ailleurs, le choix de solutions peut être

encore augmenté par la variation de proportion de chaque constituant du multimatériau (déplacement le long du chemin AB) comme illustré figure I-3.

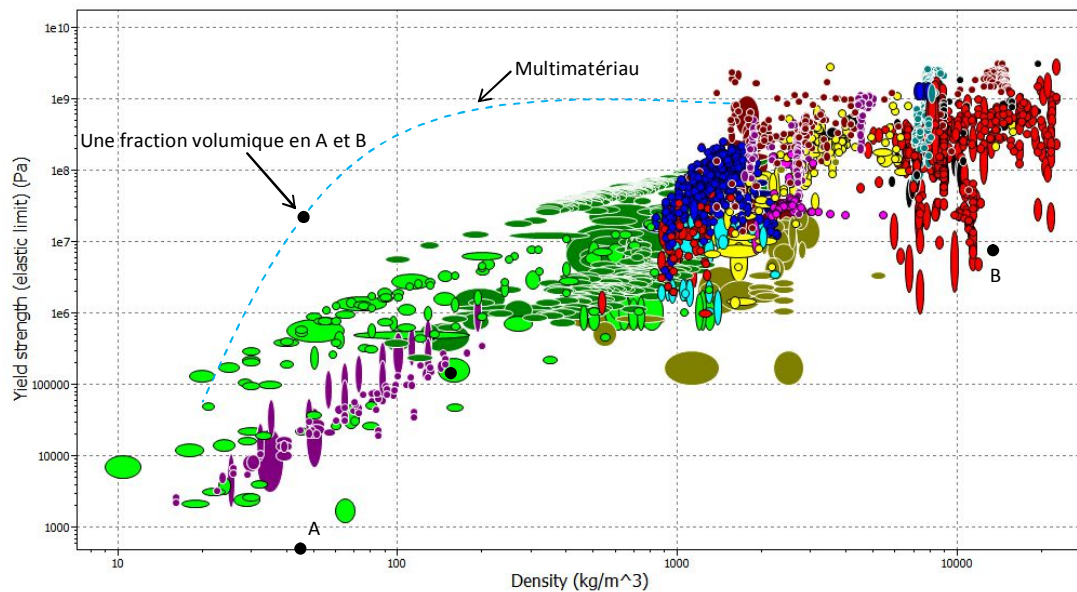


figure I-3 : Multimatéériau occupant un espace vide, logiciel CES[®]

Wargnier [WARGNIER, 2010] établit une liste relativement exhaustive des raisons qui poussent le concepteur à s'orienter vers une solution multimatéériau :

- l'amélioration des performances d'une pièce : augmentation du niveau d'exigence des astreintes du CdC. Une étape de filtration plus sévère dans ce cas peut rendre infructueuse la recherche de solutions monolithiques ;
- l'incompatibilité des astreintes du CdC : Même dans le cas de niveaux d'exigence très faibles, la recherche de solutions monolithiques peut ne donner aucun résultat si les astreintes présentent des incompatibilités, comme lorsque l'on recherche par exemple un matériau qui possède à la fois une conductivité thermique et une résistivité électrique élevées ;
- l'intégration de nouvelles fonctions dans le matériau. Il est devenu courant d'augmenter le nombre des fonctionnalités d'un produit de grande consommation. C'est le cas par exemple des chenilles de véhicules militaires blindés qui se sont vues ajouter avec le temps des fonctions anti-déchaussage, anti-mines... ;
- faciliter l'élaboration : les procédés de fabrication de matériaux composites permettent la fabrication de pièces complexes monoblocs là où l'assemblage de

plusieurs pièces était nécessaire avec des procédés de fabrications dédiés aux alliages métalliques.

I.3 Approche de la conception de multimatériau

Face à des cahiers des charges de plus en plus complexes, il peut arriver qu'aucun matériau monolithique ne puisse satisfaire toutes les requêtes. Pour trouver des solutions, le concepteur peut modifier le cahier des charges en recherchant les contraintes superflues, des niveaux de contraintes trop élevés ou encore des contraintes contradictoires.

Le concepteur peut également décider de s'orienter vers la conception d'un multimatériau. Dans ce cas, il ne s'agit plus d'un simple choix de matériau, mais de la détermination d'un nombre important de paramètres. La méthodologie de conception de multimatériau met en évidence d'une part la forte imbrication du choix ou de la conception de l'architecture et du choix des matériaux (et donc) la difficulté de les choisir simultanément. De plus, contrairement au choix de matériau qui peut se faire sur un nombre réduit de candidats, le nombre de combinaisons possibles devient très important pour un multimatériau, quelle que soit l'approche de conception choisie.

Une manière de contourner ces problèmes consiste à dissocier ces paramètres pour ne garder finalement qu'un nombre réduit de degrés de liberté (figure I-4).

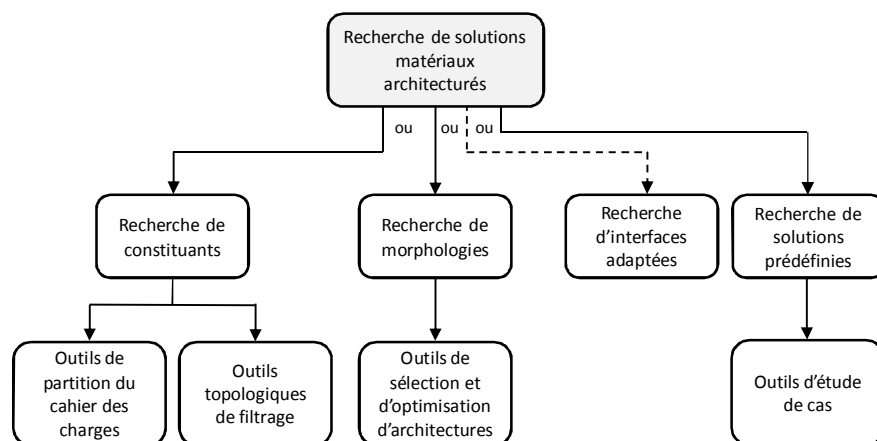


figure I-4 : Outils et méthodes dans la recherche de solutions multimatériaux selon Wagnier et al.

[WAGNIER, 2014]

Des cas spécifiques sont ainsi définis, et des méthodes de sélection peuvent être développées dans des cadres où le champ de solutions a été réduit.

I.3.1 Retour sur des méthodologies proposées

Dans la terminologie exposée précédemment, c'est le terme de matériau architecturé qui montre le mieux les différents aspects que revêt la conception d'un tel matériau. En effet, le terme « architecturé » suggère plusieurs phases supposées homogènes et distribuées de manière structurée tandis que « matériau » lui, laisse penser au contraire que la distribution des phases est suffisamment fine pour être considérée comme homogène à l'échelle de la pièce (ce qui n'est pas toujours vrai, comme le montre par exemple le cas du matériau sandwich). Le concepteur devra donc faire des choix sur des attributs relevant de la géométrie donnée à chaque constituant, de considérations propres aux matériaux employés ou encore des propriétés de l'interface.

Les possibilités accrues offertes aux concepteurs par les multimatériaux ont donc engendré le besoin de développer des démarches permettant de le guider dans le choix de ces différents attributs.

I.3.1.1 Adaptation des méthodes de sélection de matériaux

Les méthodes proposées se sont dans un premier temps appuyées sur les stratégies de sélection de matériaux monolithiques par recherche libre. Le travail d'Ashby [ASHBY, 1993] propose par exemple une démarche permettant de sélectionner les constituants d'un matériau composite à partir d'une méthode basée sur l'utilisation des indices de performances de matériaux monolithiques. L'hypothèse de base de ce travail est qu'à défaut de pouvoir évaluer précisément les propriétés des multimatériaux pour différentes architectures, des modèles analytiques d'homogénéisation permettent d'encadrer les propriétés équivalentes du matériau composite. En choisissant deux constituants, ces limites peuvent ensuite être visualisées sur une carte de propriétés, et exploitées graphiquement de manière classique. Si cette démarche permet une première approche de la prise en compte de l'architecture du multimatériau, elle demeure toutefois limitée dans la variété des architectures du fait des modèles analytiques d'homogénéisation utilisés, et ne donne pas d'indication sur l'architecture la plus appropriée. En se basant sur le même type de démarche, l'étude de Pflug et al. [PFLUG, 2006] propose d'appliquer les indices de performances et l'exploitation de cartes graphiques à une architecture sandwich. Le domaine d'étude est toutefois ici très réduit puisque les constituants du sandwich sont

figés, et que les seuls paramètres variables sont les épaisseurs de peau et d'âme. Même si elle permet de mettre en évidence l'apport d'un matériau sandwich par rapport à un matériau monolithique, cette approche ne permet pas de comparaison rapide de plusieurs architectures avec différents constituants.

Afin de prendre en compte toutes les possibilités d'architectures et de constituants dans une démarche de sélection, il est possible d'évaluer les propriétés de toutes les combinaisons possibles (par exemple par éléments finis) et de les intégrer dans une base de données de matériaux [ACEVES, 2008]. Cette méthode peut être adaptée dans des cas où l'espace de recherche est assez réduit, mais le nombre de combinaisons possibles dans ce genre de problèmes pouvant être très important, elle se révèle très lourde si des simulations numériques doivent être faites.

Le nombre d'attributs définissant le multimatériau engendre forcément un nombre de solutions gigantesque, même en ne considérant que peu de matériaux et de paramètres géométriques. Dans le but de réduire le nombre de combinaisons de matériaux possibles, le travail de Giaccobi et al. [GIACCOBI, 2010] propose un outil lié à des techniques de filtration. Le cas présenté est celui où des contraintes incompatibles obligent à chercher un multimatériau. En utilisant deux à deux les contraintes faisant intervenir la variable libre de conception de manière antagoniste, des filtres peuvent être définis et permettent d'éliminer les matériaux qui ne peuvent pas être employés comme constituant du multimatériau. Dans un deuxième temps, ces mêmes filtres sont utilisés pour déterminer les associations de matériaux envisageables. Enfin, si l'architecture du multimatériau est connue, des intervalles de fraction volumique de chaque constituant peuvent être définis pour permettre la satisfaction des différentes contraintes.

L'utilisation d'une étape de filtration permet de réduire l'espace de recherche, ne considérant ainsi qu'un espace constitué de solutions au problème de conception. Seulement, la démarche de conception dans laquelle cette filtration est proposée impose de définir préalablement l'architecture du multimatériau, ici multicouche axisymétrique et ne classe pas les solutions restantes.

Certaines études se sont concentrées sur la mise en place de méthodologies tentant d'envisager la prise en compte d'un plus grand nombre de paramètres de conception. Parmi celles-ci, les travaux de Kromm et al. [KROMM, 2007] proposent la définition de

l'architecture et des constituants d'un multimatériau dans une démarche générale de conception. En appliquant la démarche à un problème de conception d'un réservoir de transport de liquide explosif, les auteurs proposent de traiter séparément chacune des exigences du cahier des charges en cherchant une solution pour chacune d'entre elles en termes de matériau, d'architecture, ou les deux à la fois. Les réponses partielles ainsi trouvées sont ensuite regroupées, en essayant de trouver un maximum de points communs afin d'éviter un résultat trop complexe [KROMM, 2002, 2007]. Si cette méthodologie considère sur le même plan l'architecture et les constituants du multimatériau, les solutions sont apportées par le concepteur de manière intuitive. La réponse aux différentes requêtes du cahier des charges s'apparente à des sous-problèmes simplifiés auxquels on pourrait trouver des réponses classiques par des méthodes de questionnaire [EDWARDS, 2005] ou de recherche par analogie. Le risque d'une telle division du cahier des charges est toutefois de déboucher sur une grande complexité du résultat.

Dans le but d'éviter cela, un découpage plus fin des requêtes a été proposé par Wargnier et al. [WARGNIER, 2010]. Ce travail repose sur une étude des corrélations entre les critères d'un cahier des charges matériaux. A partir d'une base de données de matériaux, des analyses en composantes principales appliquées à des propriétés ou des combinaisons de propriétés permettent de déterminer si ces grandeurs sont corrélées. La corrélation des propriétés de matériaux, expliquant la présence de trous dans l'espace des matériaux, indique d'éventuelles incompatibilités des exigences du cahier des charges. Si cette analyse révèle des incompatibilités entre certaines exigences, il est alors possible d'isoler les exigences ou les objectifs incompatibles dans des sous-cahiers des charges distincts. Le développement de cet outil est inscrit dans le développement d'une démarche de conception appliquée à la conception d'un bâti de machine-outil. Ce travail fournit un outil puissant à la fois dans la recherche des raisons qui rendent une recherche de matériaux monolithiques infructueuse mais aussi dans la recherche de constituants pour la conception d'un multimatériau.

Si les démarches précédentes ont permis la proposition d'outils facilitant ou assurant la sélection des matériaux d'un multimatériau, elles ont toutefois nécessité de fixer l'architecture de celui-ci en début de processus de conception. D'autres études se sont cependant spécifiquement attachées à la proposition de démarche ou d'outils permettant la

sélection d'une morphologie.

I.3.1.2 La recherche de morphologies

La détermination de la morphologie du multimatériau peut être abordée de différentes manières en adaptant des approches existantes dans d'autres domaines. Dans un premier temps, des méthodes d'optimisation de forme, normalement destinées à définir la meilleure forme à donner à une pièce pour remplir une fonction, peuvent être utilisées pour déterminer l'arrangement des différents constituants au sein du multimatériau. Ainsi par exemple, l'optimisation d'un panneau sandwich est proposée dans le travail de Laszczyk et al. [LASZCZYK, 2009]. Les auteurs y abordent une démarche considérant l'architecture du multimatériau comme la répétition périodique d'une cellule élémentaire sur laquelle est effectuée l'optimisation de forme. Les propriétés homogénéisées de la cellule, considérée bidimensionnelle, sont calculées à partir d'une homogénéisation numérique tandis que l'optimisation de forme de la cellule élémentaire est assurée par une méthode itérative par ligne de niveau dite « level-set ». L'application de l'optimisation de formes à l'arrangement des constituants d'un multimatériau semble efficace, mais la solution obtenue est souvent dépendante de la géométrie initiale choisie. En conséquence, cette méthode paraît plus appropriée à l'amélioration d'une solution existante, ou s'il s'agit d'innovation, à une phase plus avancée de la conception qu'à la conception préliminaire.

Une autre approche, autorisant elle aussi peu de variation entre la morphologie initiale et celle proposée en fin d'optimisation, consiste à cantonner le problème à un type de morphologie, et ne garder comme degrés de libertés que des paramètres géométriques qui la définissent. Ainsi, Gasser et al. proposent une démarche de conception d'empilements cubique face centrée de sphères creuses [GASSER, 2004]. A partir du choix de paramètres géométriques d'une sphère (rayon, épaisseur de la paroi...), les auteurs définissent une méthode de sélection du matériau constitutif de l'empilement basée sur l'exploitation d'indices de performances et de cartes graphiques matériaux. Des modèles analytiques d'homogénéisation, validés par des simulations numériques sont proposés. Ils permettent la détermination des propriétés nécessaires à la sélection (module d'Young, module de cisaillement...) en fonction des paramètres géométriques. Une

démarche similaire est présentée dans le travail de Fallet et al. appliquée aux empilements cette fois-ci aléatoires de sphères creuses [FALLET, 2013]. L'intérêt de ces deux démarches proposées est double : les auteurs se sont concentrés d'une part sur la définition de paramètres géométriques d'une cellule élémentaire répétée et arrangée (de manière aléatoire ou cubique face centrée) et ont proposé d'autre part des modèles d'homogénéisation de ces nouveaux multimatériaux permettant une sélection analytique du matériau constitutif.

La démarche de conception développée dans l'étude de Leite et al. [LEITE, 2015] propose à la fois la sélection des matériaux et des paramètres géométriques d'un panneau sandwich composé d'une âme en mousse. Si les auteurs mettent en évidence l'intérêt de l'utilisation d'une méthode d'optimisation par front de Pareto associé à un algorithme génétique, la méthode de conception impose la connaissance préalable de l'architecture du multimatériau tandis que l'optimisation des peaux et du matériau d'âme s'effectue de manière découplée.

L'architecture du multimatériau regroupant tous les paramètres géométriques qui définissent l'arrangement des constituants, il est intéressant d'étudier les méthodes de sélection de formes. En effet, contrairement à ceux cités précédemment, cet outil permet une comparaison rapide de géométries très variées grâce à la notion de facteur de forme qui est introduite dans les travaux d'Ashby [ASHBY, 1991] et Weaver et al. [WEAVER, 1998] sur l'exemple d'une poutre sous diverses sollicitations. Un facteur de forme est un nombre sans dimension qui caractérise l'influence d'une forme de section droite en calculant le rapport d'une performance (raideur en flexion, torsion...) pour cette section et pour une section circulaire pleine de même surface. Ainsi, pour un mode de chargement donné, les facteurs de forme permettent la sélection de la forme de la section d'une poutre. Pour compléter cette approche, le travail de Pasini [PASINI, 2007] reprend les facteurs de forme précédents avec des différences mineures (référence à une section rectangulaire plutôt que circulaire, encombrement constant plutôt que surface constante). L'intérêt principal de cette approche est de pouvoir faire varier la surface de la section avec des variables continues, rajoutant donc un facteur d'échelle à la méthode précédente.

Une qualité de cette méthode est aussi de pouvoir traiter facilement la combinaison d'une morphologie à une échelle microscopique, associée à une forme, considérée cette fois-

ci à une échelle macroscopique (figure I-5).

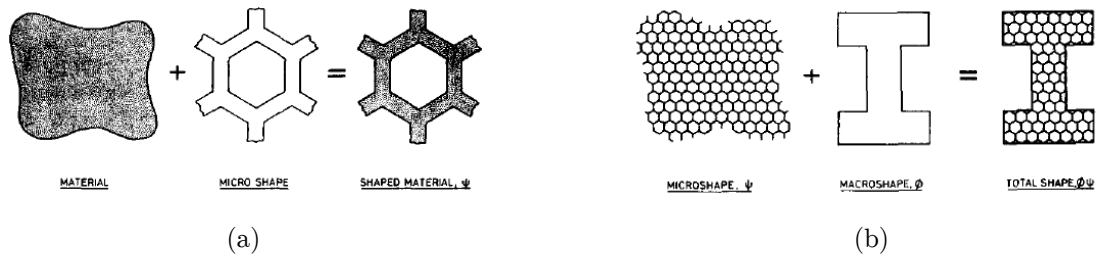


figure I-5 : Du matériau à la structure, d'après Ashby [ASHBY, 1991]

Ce type d'approche de sélection dans des bases de données de formes géométriques classiques semble intéressant, d'autant que la définition d'un critère de performance pour chacune rend ce travail très rapide. Toutefois, elles ne sont pas adaptables à un multimatériau car toutes reposent sur une hypothèse de séparation des variables dans l'expression de la performance (comme dans la définition des indices de performance). Or, si cela est possible dans le cas où seul un matériau est considéré, le fait de considérer une morphologie délimitant les différents constituants va rendre les propriétés de matériaux et les paramètres géométriques impossibles à séparer.

Dans le cas d'un multimatériau, ne pouvant séparer la performance des constituants et celle de l'architecture, l'évaluation d'une solution se fait sur l'ensemble de ces attributs par exemple en calculant les propriétés homogénéisées du matériau obtenu [DURATTI, 2002]. La sélection se fait alors soit par un balayage de toutes les solutions, soit par l'utilisation d'une méthode d'optimisation permettant d'identifier les valeurs extrêmes dans le cas d'un problème combinatoire.

I.3.1.3 Synthèse

L'ensemble des travaux exposés montre que les approches et les outils pour la conception d'un multimatériau peuvent être très variés, et qu'ils seront déterminés par les degrés de liberté laissés au concepteur. En supposant les interfaces entre les constituants comme parfaitement adhésives, les paramètres qu'il reste à définir sont la nature des constituants, leur morphologie, et leurs proportions (qui sont en général déterminées par des paramètres géométriques attachés à la morphologie). Il est classique de déterminer les constituants à partir de bases de données de matériaux. En effet, les matériaux

monolithiques ne permettent pas d'atteindre toutes les valeurs de propriétés ou de combinaisons de propriétés. Traiter ces grandeurs comme continues et indépendantes entre elles n'est donc pas une approche adaptée pour une sélection de matériaux.

En ce qui concerne la définition d'une architecture, plusieurs approches sont possibles. En effet, il est possible soit d'utiliser une méthode d'optimisation de forme, soit de choisir une architecture dans une base de données préétablie. La seconde méthode présente l'avantage de permettre d'aborder et de comparer des morphologies très différentes très rapidement, tout en conservant des paramètres dimensionnels continus pour une première optimisation. A l'inverse, les méthodes d'optimisation de formes autoriseront peu de variation par rapport à la géométrie de départ, donc seront moins adaptées aux premières étapes de la conception du multimatériau. En revanche, elles peuvent être utilisées après avoir choisi une architecture dans une base de données, car elles permettent d'assouplir le cadre strict du jeu de paramètres géométriques qui définissent un type de morphologie. La combinaison de ces deux approches offre ainsi un bon compromis, car la constitution d'une base de données limite implicitement le choix à quelques types figés de morphologie, mais ce domaine peut ensuite être étendu grâce aux méthodes d'optimisation qui peuvent faire évoluer des formes géométriques de manière continue.

La démarche développée dans cette étude s'appuiera donc sur une base de données d'architectures qui devra être créée. Le choix d'une architecture paraissant indissociable du choix des constituants, une méthode séquentielle ne semble pas envisageable ici. Les constituants devront donc être choisis dans une base de données lors de la même étape (figure I-6).

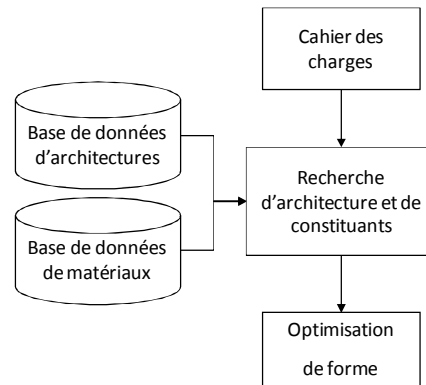


figure I-6 : Méthode de sélection d'architecture et matériaux

L'orientation vers une telle démarche de conception met en lumière des problématiques précises soulevées par la conception d'un multimatériau :

- comment considérer le multimatériau ? Un multimatériau est défini par la coexistence de plusieurs échelles pouvant nécessiter de subdiviser son architecture. Les travaux précédents montrent qu'il est possible de considérer le multimatériau comme la répétition d'une cellule représentative. L'évaluation de la performance d'une solution passe donc par des calculs de propriétés homogénéisées à différentes échelles au sein de cette cellule représentative ;
- comment caractériser le comportement du multimatériau ? Proposer une architecture et des constituants nécessite de pouvoir définir ses propriétés homogénéisées. Pour cela, des modèles de comportement, de préférence analytiques mais pouvant être aussi numériques, doivent être identifiés dans la littérature ou développés spécifiquement pour une étude.
- vers quel outil d'optimisation se tourner pour la proposition d'une solution optimisée ? Les rôles de l'architecture et des constituants ne pouvant être dissociés dans l'évaluation des propriétés du multimatériau, ils doivent être choisis simultanément. Que l'architecture soit traitée comme un paramètre continu ou choisie dans une base de données, le fait de devoir déterminer les constituants rend le problème forcément combinatoire. Des algorithmes de recherche, d'optimisation, sont en mesure de guider le concepteur.

I.3.2 Structuration de la base de données d'architecture : démarche et exemples

Dans cette étude, une démarche de sélection par recherche libre a été adoptée. Cette stratégie est basée sur le choix de l'architecture et le choix des constituants respectivement dans une base de données d'architectures associées à une base de données de matériaux. Une partie de la démarche consiste donc à élaborer une structuration de l'architecture d'un multimatériau permettant sa définition complète. Cette structuration est fondée sur la coexistence de plusieurs échelles au sein du multimatériau : un multimatériau peut être discrétisé en proposant une hiérarchisation des différentes échelles nécessaires à sa construction. Ce constat est retrouvé dans le travail de Dunlop et al. **[DUNLOP, 2013]** basé sur l'observation des architectures de divers matériaux naturels. Les auteurs y illustrent la manière dont ces matériaux sont structurés à différentes échelles : le bois, les os ou même les carapaces de homards utilisent une architecture à l'échelle des matériaux pour construire des structures fonctionnelles complexes à partir de blocs élémentaires.

Dans ce travail, l'élaboration de la démarche a été guidée par le travail d'observation expérimentale d'une fibre naturelle réalisé dans l'étude de Bergander et al. **[BERGANDER, 2002]**. Dans leur étude, les auteurs ont montré qu'une fibre naturelle (en l'occurrence de bois) pouvait être considérée comme un matériau composite renforcé par des fibrilles de cellulose et dont la matrice est principalement composée d'hémicellulose et de lignine. Dans ses travaux, Baley **[BALEY, 2003]** définit également une fibre végétale en l'assimilant à un empilement de plis composites dont la structure est constituée d'une paroi primaire et d'une paroi secondaire, elle-même constituée de trois couches : S1, S2 et S3. Par ailleurs, les travaux de Baley définissent à plus fort grossissement que les parois cellulaires sont formées d'éléments plus fins, les microfibrilles, séparées par des espaces inter fibrillaires (figure I-7).

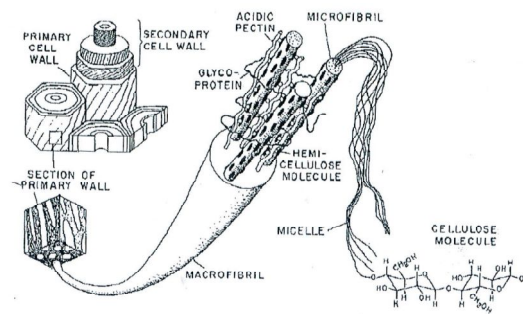


figure I-7 : Représentation schématique de l'architecture d'une fibre végétale [BALEY, 2003]

La fibre végétale peut donc être structurée à partir de la répétition d'un élément qui pourrait être représenté par des fibrilles de cellulose noyées dans une matrice de lignine. La répétition de cet élément permet de générer la fibre. Aux échelles d'observation inférieures, l'étude de cet élément révèle l'existence de subdivisions supplémentaires qui présentent une architecture similaire de type composite. Plusieurs échelles successives d'observation se succèdent avec un constat identique : les subdivisions supplémentaires qui décrivent l'échelle précédente présentent une architecture similaire de type composite qui mène à de nouvelles subdivisions. Ce travail se propose de rationaliser les constatations effectuées sur une fibre végétale pour guider une démarche de structuration de l'architecture d'un multimatériau.

Considérons un domaine d'intérêt macroscopique $\Omega \subset \mathbb{R}^d$ avec $d=1, 2$ ou 3 indiquant les dimensions spatiales. Le domaine Ω représente la pièce. Ce domaine d'intérêt est construit à partir de la répétition d'un volume caractéristique hétérogène appelé volume représentatif (VR). Celui-ci présente au moins une dimension très petite devant les dimensions de la pièce qu'il compose. L'hétérogénéité du volume représentatif (VR) est décrite par son architecture. Le volume représentatif peut présenter une architecture complexe. Le problème de définition de l'architecture de la pièce revient donc à traiter le problème de l'hétérogénéité du volume représentatif. Afin de rendre compte de cette hétérogénéité, celui-ci est donc modélisé comme l'assemblage de sous-structures. Le volume représentatif présente un nombre fini de sous-structurations repérées par leurs indices. Les échelles de sous-structuration sont appelées rangs. Les sous-structures de rang 1 sont notées D_i avec $i \in \mathbb{N}$ telles que $\sum_i D_i = VR$. Les sous-structures de rang 2 sont notées

D_{ij} avec $i, j \in \mathbb{N}$ telles que $\sum_i \sum_j D_{ij} = VR$. Chaque sous-structure est définie pour un niveau donné de sous-structuration, le numéro de rang de sous-structuration correspond au nombre d'indice utilisé pour qualifier la sous-structure étudiée (figure I-8). Au terme du processus de partition, il n'est plus possible de réaliser de divisions supplémentaires, les phases constitutives des sous-structures sont homogènes. Les dernières sous-structurations sont appelées motifs.

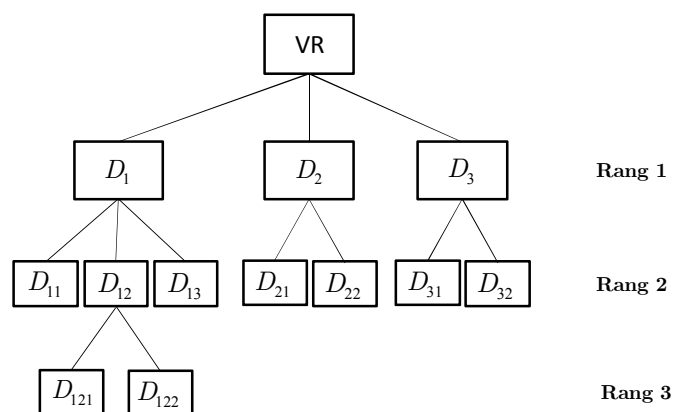


figure I-8 : Principe de structuration du VR

Dans la figure I-8 on notera que les sous-structures D_{11} , D_{121} , D_{122} , D_{13} , D_{21} , D_{22} , D_{31} , D_{32} constituent des motifs.

Le tableau I-2 présente la démarche générale de structuration de la base de données d'architecture développée dans ce travail.

| Echelle | Elément | Attributs | Domaine d'existence |
|---------------------------------|---------------------------------|--|---|
| Echelle macroscopique | Pièce | Caractéristiques physiques et géométriques de la pièce | Ω |
| Echelle du volume représentatif | Volume représentatif VR | Caractéristiques physiques et géométriques du VR | VR |
| Echelle intermédiaire | Sous-structures D_i | Caractéristiques physiques et géométriques des sous-structures du VR | D_i avec $i \in \mathbb{N}$ |
| | Sous-structures $D_{ij\dots P}$ | Caractéristiques physiques et géométriques des sous-structures de rang 2 à P | $D_{ij\dots P}$ avec $i,j,\dots,P \in \mathbb{N}$ |
| | Motifs | Caractéristiques physiques, géométriques et matériaux des phases des motifs | $D_{i\dots P}$ avec $i,\dots,P \in \mathbb{N}$ |

tableau I-2 : Démarche de structuration d'une base de données d'architectures

L'approche présentée précédemment conduit à définir l'architecture de la pièce par une répétition périodique du volume représentatif sur une, deux ou trois directions de l'espace ou par invariance en translation du volume représentatif dans une, deux, ou trois directions de l'espace.

i. Géométrie de type profilé : exemples de structures invariantes ou périodiques dans une direction

Considérons par exemple un multimatériau de type profilé, celui-ci peut être considéré comme la répétition de la structure d'un VR dans une direction de l'espace.

La poutre simple massive mono-matériau de section quelconque illustre le niveau de complexité le plus faible de cette catégorie. Le volume représentatif VR est défini par une portion de section de poutre, la poutre est alors construite par invariance de translation dans la direction perpendiculaire à la section de ce VR. L'architecture du VR est constituée d'un unique motif de type « monolithique » caractérisé par les propriétés du matériau constitutif de la poutre.

La figure I-9a présente un premier exemple de poutre architecturée. Le volume

représentatif VR est défini par une portion homogène rectangulaire de section de poutre, de sorte que la poutre soit construite par la répétition périodique dans une direction perpendiculaire à la section du VR (figure I-9b).

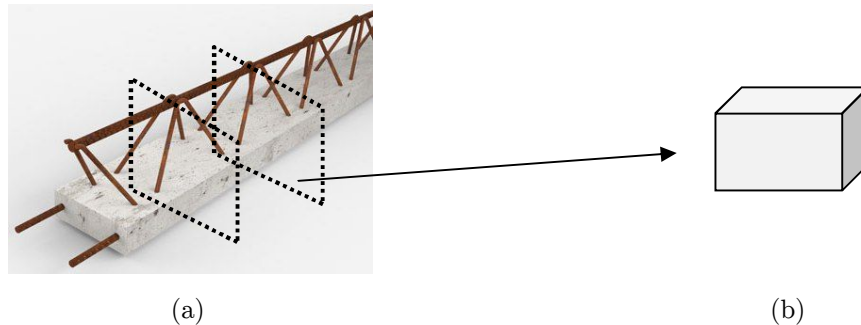


figure I-9 : (a) Représentation d'une poutre architecturée et (b) son VR

Dans ce cas, les trois sous-structures de rang 1 du VR sont construites à partir d'une plaque contenant les deux inserts circulaires, les fils de suspension et la barre cylindrique supérieure de soutien (figure I-10). Certaines sous-structures de rang 1 peuvent être divisées en sous-structures de rang 2. Par exemple, la plaque contenant les deux inserts circulaires sera déclinée en 2 sous-structures de rang 2, l'une constituée d'inserts cylindriques et l'autre de la plaque trouée. Les fils de suspension et la barre cylindrique supérieure de soutien constituent quant à eux des motifs.

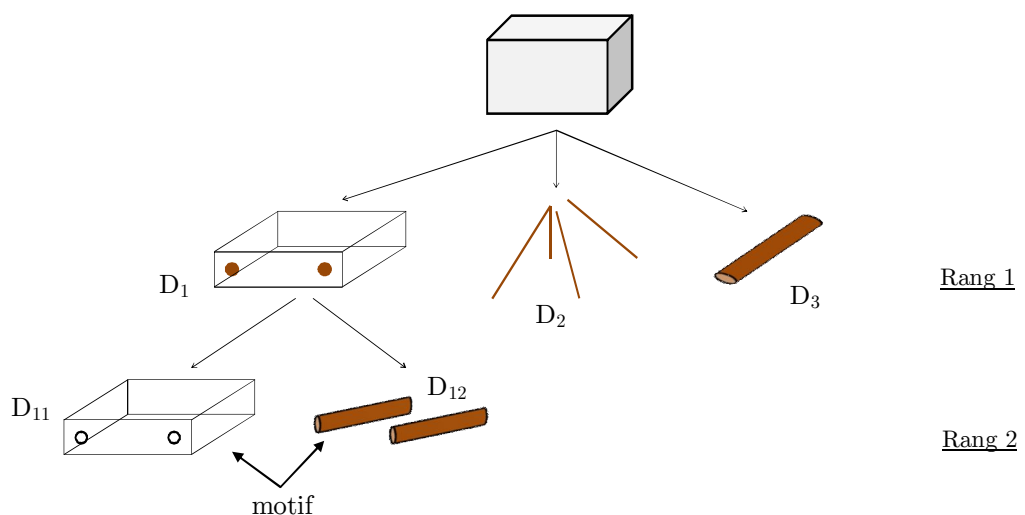


figure I-10 : Décomposition du VR de la poutre architecturée

Considérons maintenant l'exemple d'un câble (figure I-11a), le volume représentatif VR est défini par une portion cylindrique représentant une section de poutre circulaire

(figure I-11b). Le câble est alors construit par invariance de translation dans la direction perpendiculaire à la section du VR.

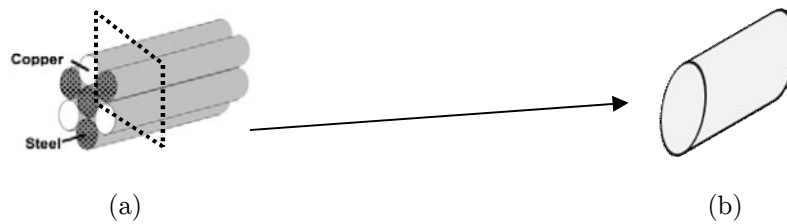


figure I-11 : (a) Représentation d'une poutre segmentée, d'après Bréchet et al. [ASHBY, 2003] et (b) son VR

Des sous-domaines de rang 1 peuvent être définis pour subdiviser le VR. Les sous-structures de rang 1 seront chacune composées d'une portion de fil de cuivre ou d'acier entourée de vide et constituent un motif (figure I-12).

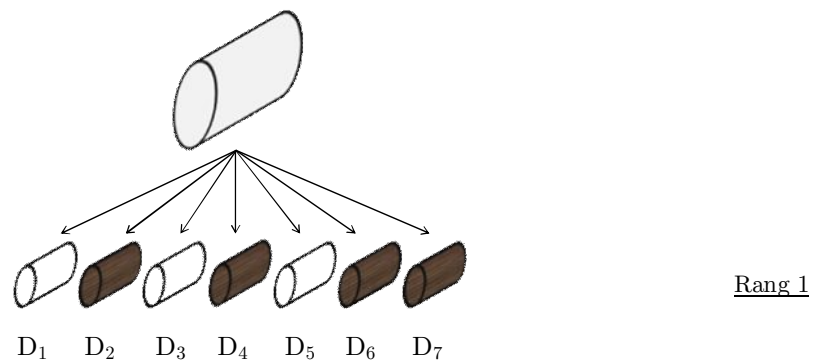


figure I-12 : Décomposition du VR de la poutre segmentée

Il convient de noter que dans le cas d'un câble segmenté présentant une torsion des fils constitutifs, le volume représentatif VR est de la même façon défini par une portion de section de câble. Les sous-structures de rang 1 seront également chacune composées d'une portion de fil de cuivre ou d'acier entourée de vide. Par ailleurs, le câble segmenté sera construit par une répétition périodique du VR avec une période correspondant à la périodicité de torsion.

La figure I-13a présente le cas d'une pale d'hélicoptère. Cette géométrie de pièce de type profilé est définie par invariance de translation dans une direction perpendiculaire à la section du VR (figure I-13b).

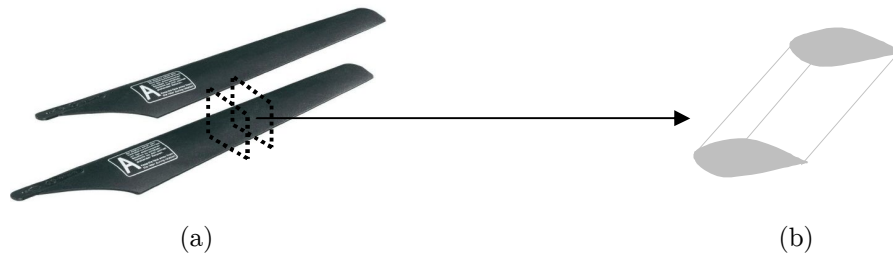


figure I-13 : (a) Représentation d'une pale d'hélicoptère et (b) son VR

Le volume représentatif peut cette fois être subdivisé en trois sous-structures de rang 1. Chaque sous-structure de rang 1 sera décomposée en sous-structures de rang supérieur (figure I-14).

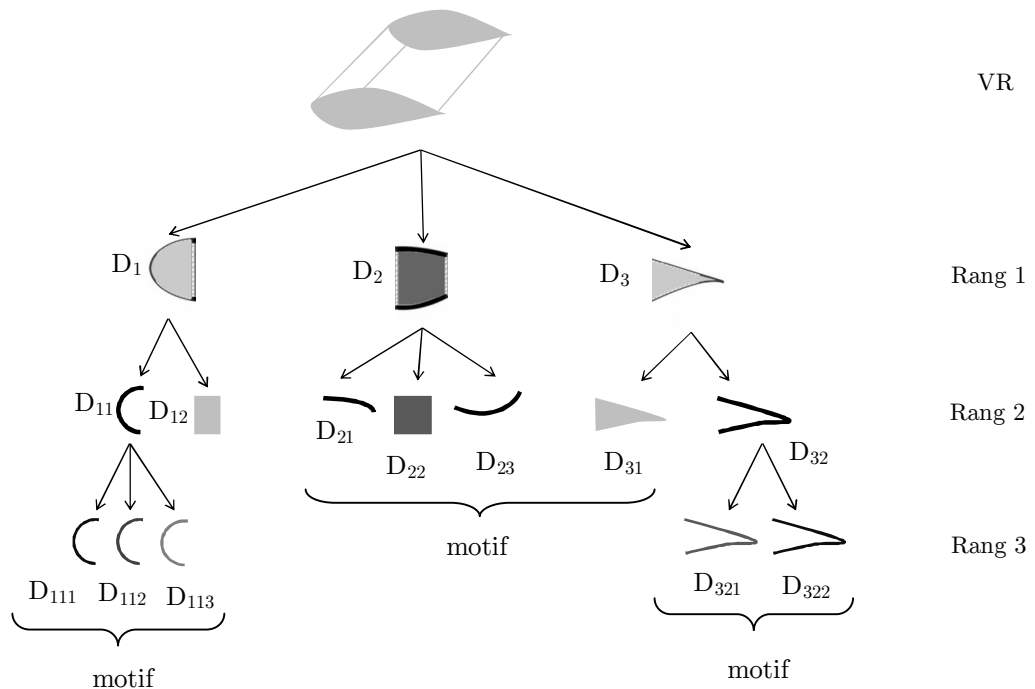


figure I-14 : Décomposition du VR de la pale

L'exemple précédent démontre la non unicité de la structuration du volume représentatif. Le choix du nombre de sous-structures de rang 1, 2 ou 3 appartient au concepteur et repose sur la construction des bases de données de motifs.

ii. Géométrie de type plaque ou coque : exemples de structures invariantes ou périodiques dans deux directions

De nombreux multimatériaux peuvent être caractérisés par une géométrie de type plaque ou coque dont l'épaisseur est négligeable devant les dimensions du plan de la

plaque ou de la coque. Les géométries de type plaque ou coque peuvent être obtenues par invariance en translation ou par une répétition périodique dans deux directions de l'espace d'un même volume représentatif.

Les travaux de Boussu et al. [BOUSSU, 2008] traitent par exemple de la fabrication de multicouches stratifiées basées sur l'empilement de tissus interlocks. Associés à un dépôt d'alumine sur la partie supérieure, ces composites assurent une fonction de blindage pare-balles de véhicules militaires.

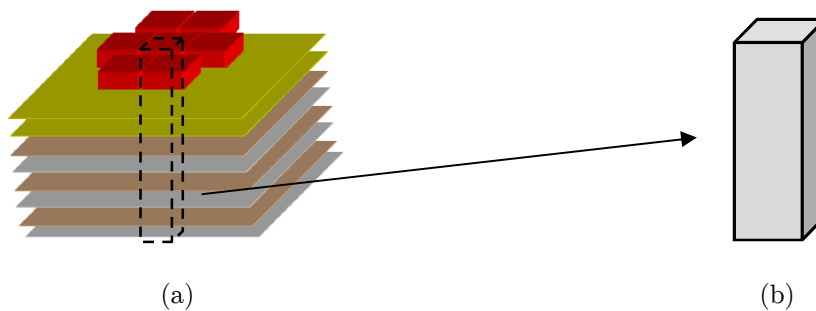


figure I-15 : (a) Représentation schématique d'un composite stratifié pare-balles selon Boussu et al. [BOUSSU, 2008] et (b) son VR

Ces composites fonctionnels (figure I-15a) peuvent être construits à partir d'un volume représentatif VR défini par une portion de section de pièce. Si le dépôt supérieur d'alumine est considéré comme segmentée, le VR peut être généré à partir d'une périodicité dans les deux directions du plan. Si la couche supérieure est considérée comme continue, l'invariance par translation dans les deux directions du plan du VR permet de générer le composite. Le VR (figure I-15b) présente dans ce cas une architecture multicouche. Chaque couche constitue une sous-structure de rang 1. Dans le cas du VR présenté en figure I-15b, la sous-structure D_1 correspondant au dépôt d'alumine ainsi que l'ensemble des sous-structures de rang 2 (fibre/résine) constituent des motifs dont les propriétés géométriques ou physiques (matériaux, fractions volumiques, orientations des fibres...) peuvent différer (figure I-16).

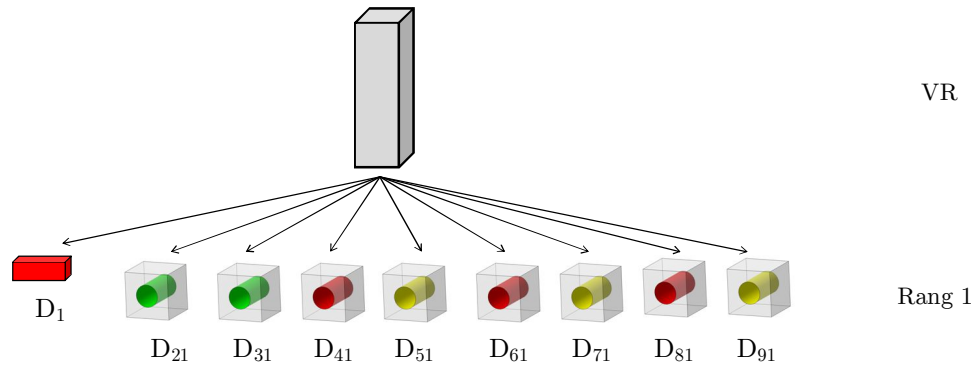


figure I-16 : Décomposition du VR du stratifié

L'exemple des travaux de Bollen et al. sur les structures sandwich [BOLLEN, 2013] entre également dans le cadre de la structuration de la base d'architecture proposée. Dans leur étude, les auteurs développent une architecture composée d'une âme nida remplie d'une mousse polymère renforcée avec des nanotubes de carbone et de peaux composites à fibres de verre (figure I-17a). Ces composites fonctionnels permettent l'obtention d'un multimatériau offrant un fort blindage électromagnétique associé à une très grande raideur spécifique. Dans ce cas, cette structure sandwich peut être construite à partir d'un volume représentatif VR défini par une portion de section de composite (figure I-17b). Ce VR présente une architecture multicouche plane construite à partir de l'association de cellules nida hexagonales régulières et de peaux inférieures et supérieures (b).

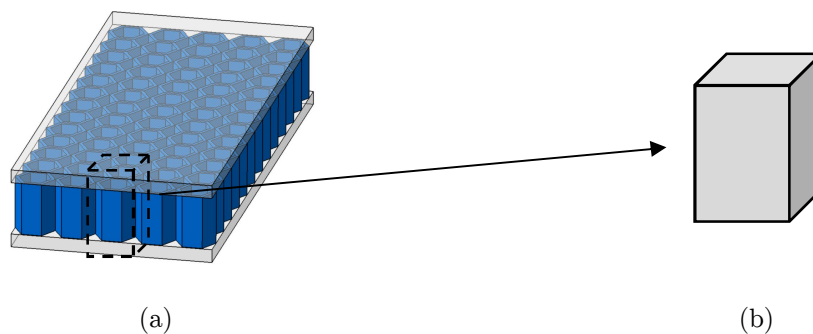


figure I-17 : (a) Représentation schématique d'un sandwich et (b) son VR

La figure I-18 présente la démarche de structuration du VR.

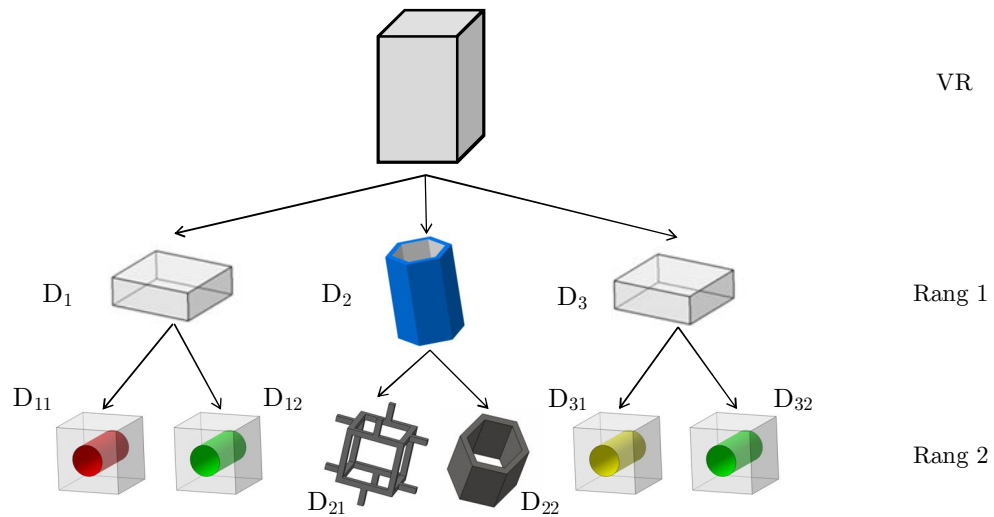


figure I-18 : Décomposition du VR du sandwich

Les trois sous-structures de rang 1 sont les suivantes : une portion de peau composite inférieure, une association de cellules nida hexagonales régulières remplies d'une mousse polymère et une portion de peau composite supérieure.

Les peaux composites ainsi que le matériau d'âme en nida renforcé par une mousse polymère constituent une sous-structure de rang 1. Les sous-structures de rang 2 constituent les motifs des peaux composites supérieures et inférieures ainsi que le nida associé à une mousse à cellules ouvertes.

Considérons maintenant l'exemple des travaux de Dyskin et al. [DYSKIN, 2003, 2001] qui proposent un nouveau concept de design de matériaux basé sur l'utilisation d'assemblages réguliers d'éléments topologiquement verrouillés (figure I-19).

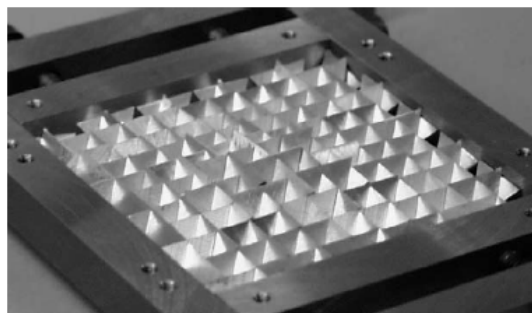


figure I-19 : Assemblage de tétraèdres verrouillés d'après Dyskin et al. [DYSKIN, 2003]

Ces multimatériaux peuvent être obtenus par la répétition périodique dans les deux directions du plan de la pièce d'un volume représentatif composé d'une seule couche

d'éléments tétraédriques. Il est possible dans ce cas de remarquer que les éléments tétraédriques constituent l'unique architecture du VR et peuvent être considérés comme des motifs.

iii. Géométrie de type volumique, exemples de structures invariantes dans deux directions

Les géométries de type volumique ne disposent pas de dimensions privilégiées et peuvent être caractérisées par invariance de translation ou par une répétition périodique dans les trois de l'espace d'un même volume représentatif.

Par exemple, l'étude expérimentale et théorique de treillis formés de motifs octaédriques est proposée dans les travaux de Deshpande et al. [DESHPANDE, 2001]. Le treillis (figure I-20a) peut être considéré comme une géométrie de type volumique, construite à partir de la répétition dans les trois directions du repère de la pièce d'un volume représentatif constitué d'un assemblage de poutres constitutives du treillis (figure I-20b). Ce VR constitue un motif.

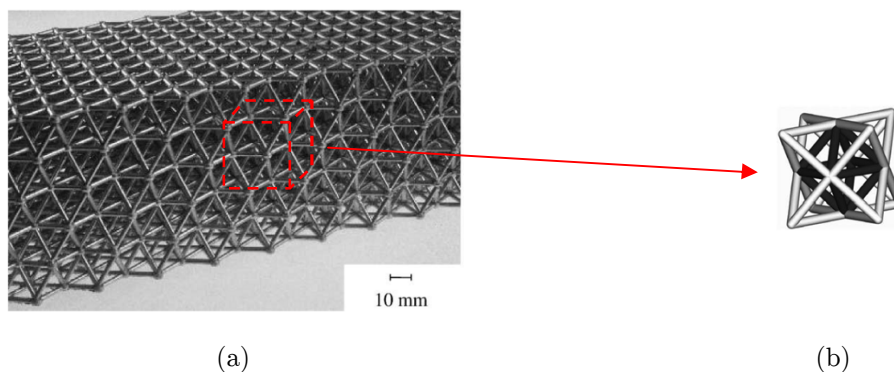


figure I-20 : (a) Treillis de motifs octaédriques fabriqué à partir d'un alliage d'aluminium et (b) son VR, d'après Deshpande et al. [DESHPANDE, 2001]

Considérons maintenant les travaux de Torquato et al [TORQUATO, 2002] qui concernent des composites multifonctionnels permettant le transport simultané de chaleur et d'électricité. Dans leurs travaux, Torquato et al ont ciblé des matériaux composites présentant deux phases en proportions égales, l'une présentant une bonne conductivité thermique et une faible conductivité électrique et la seconde présentant une bonne conductivité électrique et une faible conductivité thermique. Torquato et al., ont montré qu'un composite bicontinu dans lequel les deux phases sont connectées à travers

l'échantillon et présentant une surface d'échange minimale répétée selon une périodicité sur trois niveaux constitue la meilleure solution en réponse à ce problème. Une schématisation de la solution optimale déterminée est présentée figure I-21.

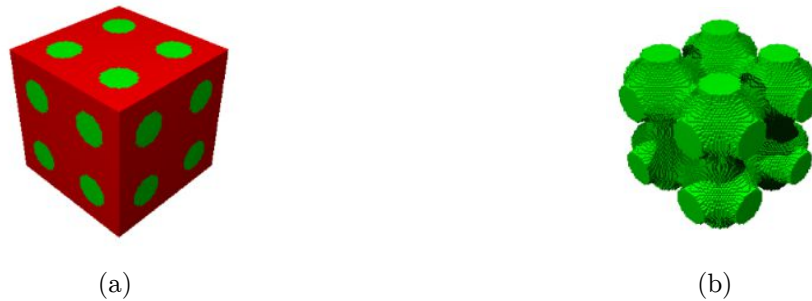


figure I-21 : (a) Représentation d'une cellule unitaire composite et (b) morphologie de la seconde phase associée d'après Torquato et al [TORQUATO, 2002]

Ce multimatériau multifonctionnel peut être construit à partir d'un volume représentatif VR défini par une portion de section de composite (figure I-21a) et répété selon une périodicité sur trois niveaux. Les deux sous-structures de rang 1 sont représentées par deux phases homogènes : une phase 1 (en rouge) et une phase 2 (en vert). Ces deux phases constituent des motifs.

La généralisation de la hiérarchisation de la base de données d'architecture proposée dans ce travail a été validée sur plusieurs cas d'étude de multimatériaux. Le cadre général défini dans cette étude pour la hiérarchisation de la base de données d'architecture permet de traiter un nombre important de multimatériaux. Il conviendra tout de même de noter que cette hiérarchisation nécessite de concentrer l'étude sur des structures qui peuvent être représentées par invariance en translation d'un volume représentatif ou par la répétition périodique de ce VR sur une, deux ou trois directions. Par ailleurs, il n'y a pas unicité de la structuration des volumes représentatifs.

I.3.3 Cadre de la méthodologie développée

La démarche de conception de multimatériau proposée s'appuiera sur la stratégie générale de subdivisions de la base de données d'architecture présentée précédemment.

I.3.3.1 Stratégie de subdivision

Dans la suite de ce travail, le volume représentatif VR pourra être répété dans une, deux ou trois directions pour générer la pièce par invariance ou périodicité. L'étude développée précédemment sur des multimatériaux s'est concentrée sur des géométries de type profilé, plaque, coque ou volumique. De nombreux produits fabriqués à partir de matériaux architecturés présentent des architectures de type multicouche. Dans cette étude, une démarche de conception de multimatériaux centrée sur une architecture multicouche sera développée mais cette démarche sera transférable à un autre type d'architecture.

La méthode de conception proposée est appliquée à la conception d'une plaque plane multicouche dont le nombre de sous-structures a été limité à deux. Les sous-structures de rang 1 sont les différentes couches du volume représentatif, les sous-structures de rang 2 sont appelées motifs géométriques. Ces motifs géométriques représentent les constituants élémentaires permettant de générer les couches par répétition périodique ou invariance par translation dans une, deux ou trois directions.

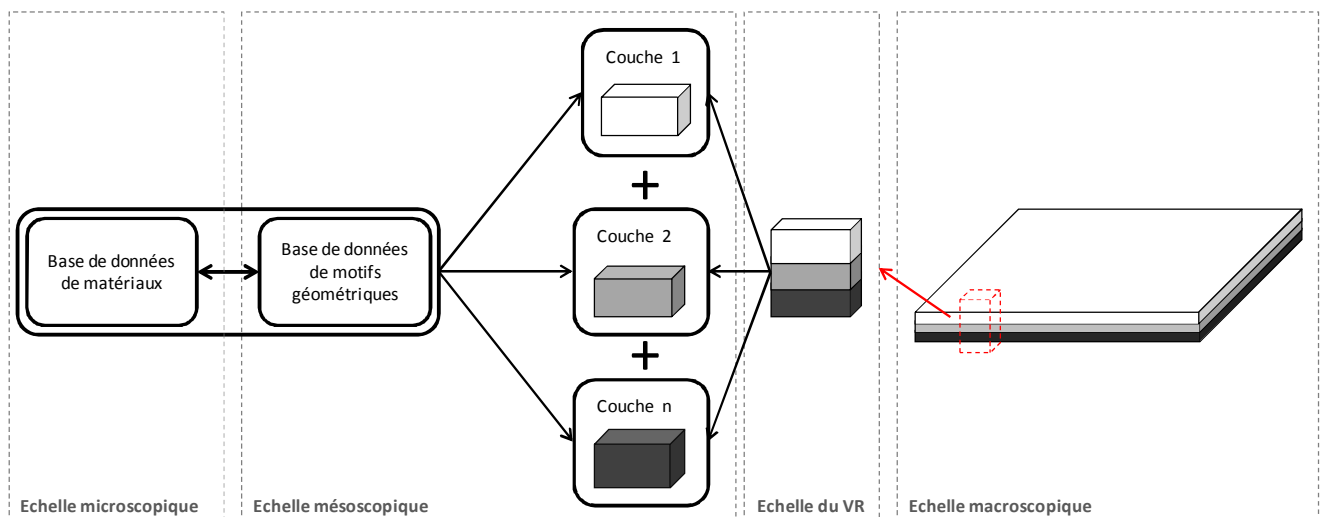


figure I-22 : Un multimatériau multicouche plan à ses différentes échelles

L'échelle macroscopique représente donc l'échelle de la pièce, l'échelle du volume représentatif du multicouche plan constitue le second niveau d'observation. Celui-ci est discrétisé en plusieurs couches dans son épaisseur. A une échelle mésoscopique, deux sous-domaines coexistent, celui de l'étude des couches et celui de l'étude des motifs

géométriques élémentaires qui composent les couches. L'échelle microscopique est ici définie par les matériaux constitutifs des motifs géométriques (figure I-22).

Les multimatériaux sont aussi caractérisés par la nature des interfaces entre les couches et entre les constituants au sein d'un motif. Les interfaces contribuent à part entière dans le comportement du multimatériau et doivent être prises en compte dans l'étape de conception. Dans un souci de réduction du nombre de paramètres de conception dans ce travail, les interfaces entre chaque couche du multicouche seront considérées comme parfaites.

L'ensemble de la structuration du volume représentatif s'appuie sur des bases de données de motifs géométriques élémentaires et de matériaux associés. Le travail présenté par la suite porte sur la création de ces bases de données nécessaires à la résolution du problème de conception.

I.3.3.2 Construction des bases de données de motifs géométriques et de matériaux

Une hiérarchisation de la base de données de motifs géométriques est proposée dans les travaux de Ashby et al [ASHBY, 2003]. Dans notre travail, cette base de données est complétée pour être représentative de la variété des morphologies propres aux multimatériaux. La base de données de motifs géométriques (figure I-23) est hiérarchisée autour de trois catégories de motifs.

i. les motifs cellulaires : les travaux de Fallet [FALLET, 2008] définissent les matériaux cellulaires comme étant des matériaux présentant une porosité supérieure à 70%. Les matériaux cellulaires sont hiérarchisés en différentes catégories suivant la structure et la sollicitation dominante :

- les mousses : matériaux cellulaires définis par une structure tridimensionnelle dont les éléments se déforment en flexion lorsqu'un chargement est appliqué ;
- les nidas : matériaux cellulaires définis par une structure bidimensionnelle, adoptant un motif périodique dans le plan ;

- les treillis : matériaux cellulaires définis par une structure tridimensionnelle constituée de barres qui se déforment uniquement en traction et en compression.
- les empilements CFC de sphères creuses : matériaux cellulaires définis par une structure tridimensionnelle avec une périodicité dans les trois directions. Ces motifs géométriques ont été ajoutés par rapport à la hiérarchisation proposée par Ashby et al. [ASHBY, 2003] suite aux travaux de Gasser et al. [GASSER, 2004] illustrant l'intérêt de ce type de motif géométrique dans la construction de nouveaux multimatériaux.

ii. les motifs composites : constitué de l'assemblage d'au moins deux matériaux non miscibles et de nature différente, se complétant et permettant d'aboutir à un matériau dont l'ensemble des performances est supérieur à celui des composants pris séparément [BERTHELOT, 2005]. Une hiérarchisation admise dans la littérature de ces motifs composites est proposée dans le travail d'Ashby [ASHBY, 1993] qui classe notamment les fibres continues, les fibres courtes et les renforts particuliers. Les composites à renforts fibreux tissés sont ajoutés dans cette base de données en les considérant comme un stratifié bi-axial $0^\circ/90^\circ$ dont l'effet de l'ondulation des fils serait négligé [BERTHELOT, 2005].

iii. les motifs monolithiques : matériaux massifs de la base de données de matériaux.

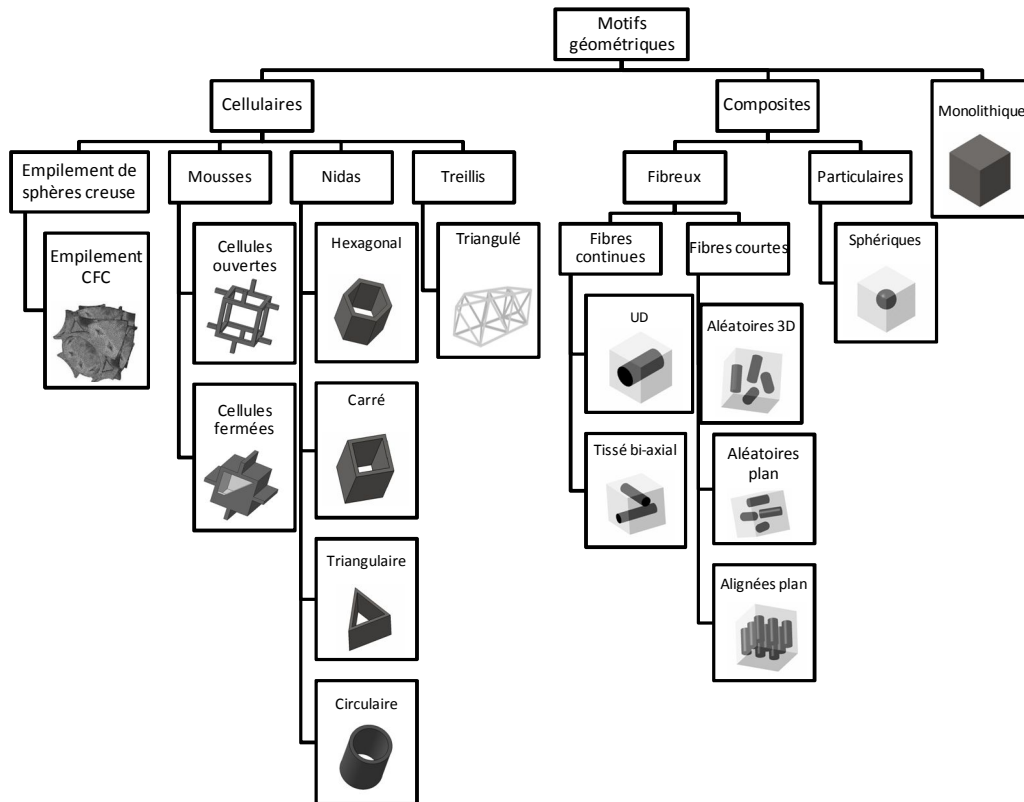


figure I-23 : La base de données hiérarchisée de motifs géométriques élémentaires

Par ailleurs, certaines sollicitations peuvent nécessiter l’ajout de motifs spécifiques. Parmi eux, les motifs géométriques de type « egg-box » (figure I-24) dont la géométrie favorise l’absorption d’énergie [ZUPAN, 2003].



figure I-24 : Représentation de panneaux « egg-box », d’après Zupan et al. [ZUPAN, 2003]

Plus particulièrement, dans le cadre de ce travail, il était nécessaire de s’appuyer et de référencer des motifs géométriques permettant une amélioration des conditions de dissipation thermique. Ainsi, les motifs géométriques de type ailette ou picot ont été intégrés à la base de données de motifs géométriques. Ces motifs spécifiques à la dissipation de flux thermiques favorisent les phénomènes convectifs par une augmentation

de la surface d'échange.

Cette base de données de motifs géométriques élémentaires est associée à une base de données de matériaux (tableau I-3). Le but de cette association n'est pas d'assurer une exhaustivité des combinaisons possibles matériaux/architecture mais plutôt de montrer l'efficacité de la méthode de conception de multimatériaux développée en assurant une représentativité diversifiée des différents matériaux de base.

| Famille | | Nombre de matériaux contenus dans la base de données |
|--------------------------------|------------|--|
| Métaux et alliages métalliques | Massifs | 16 |
| | Fibres | 5 |
| Matériaux polymères | Massifs | 22 |
| | Fibres | 1 |
| Matériaux céramiques | Massifs | 10 |
| | Fibres | 5 |
| | Particules | 3 |
| Matériaux naturels | Massifs | 3 |
| | Fibres | 1 |

tableau I-3 : La base de données de matériaux constitutifs.

La base se composera donc de métaux et alliages métalliques, de matériaux polymères, de matériaux céramiques et de matériaux naturels. A ces matériaux sont ajoutés des matériaux métalliques, céramiques, polymères et naturels qui constitueront les renforts des motifs géométriques élémentaires de la classe des motifs géométriques composites.

I.3.4 Une évaluation multi-échelle des propriétés du multimatériau

La sélection d'une architecture optimale s'appuie sur la formalisation d'un critère de classification. Ce critère nécessite l'évaluation des propriétés homogénéisées des multimatériaux considérés.

I.3.4.1 Echelle macroscopique : Homogénéisation des propriétés du multimatériau

Cette évaluation des propriétés du multimatériau, à l'échelle de la pièce, peut être traitée de différentes manières. Lorsque la géométrie de la pièce et les conditions de sollicitations l'autorisent, la définition des propriétés à l'échelle de la pièce peut être estimée analytiquement. Si les phénomènes physiques deviennent trop complexes pour être analytiquement formulés ou lorsque la pièce présente une géométrie trop complexe, la définition des propriétés homogénéisées peut être assurée numériquement.

I.3.4.2 Echelle mésoscopique : Homogénéisation des propriétés des motifs du multimatériau

La prédiction des propriétés homogénéisées à l'échelle des couches du multimatériau, à l'échelle du motif géométrique, est proposée dans ce travail à l'aide de modèles d'homogénéisation analytiques. Cependant, au vu des nombreux modèles d'homogénéisation analytique disponibles, il est important d'adopter un système de classification de ces modèles afin de mieux appréhender la contribution de chacun dans la prédiction du comportement des matériaux hétérogènes. Boudenne [BOUDENNE, 2003] et Dirrenberger [DIRRENBARGER, 2012] reprennent dans leurs travaux une classification des modèles de prédiction théorique proposée en 1991 par Mottram et al. [MOTTRAM, 1991]. Dans cette classification, les matériaux hétérogènes sont définis comme des matériaux à deux phases constitués de renforts (phase dispersée) dans une matrice (phase continue). Les modèles analytiques d'homogénéisation peuvent être regroupés en fonction des paramètres pris en compte :

- modèle d'ordre 0 : la propriété équivalente P du matériau composite est bornée par les propriétés de chacun des constituants P_m et P_f ;

$$P_m \leq P_{eq} \leq P_f \quad (\text{I-1})$$

- modèle d'ordre 1 : la propriété équivalente du matériau hétérogène est bornée par les propriétés pondérées par les fractions volumiques de chacun des constituants V_m et V_f ;

$$\left[\frac{1}{\frac{V_m}{P_m} + \frac{V_f}{P_f}} \right] \leq P_{eq} \leq (P_m.V_m + P_f.V_f) \quad (I-2)$$

- modèle d'ordre 2 : Un modèle de second ordre prend en compte la géométrie des renforts (sphères, cubes, cylindres...) ainsi que la perturbation entre les différentes phases du matériau hétérogène (interactions entre les différentes phases du système) ;
- modèle d'ordre 3 : Le modèle de troisième ordre prend lui aussi en compte la perturbation entre les différentes phases, la géométrie des inclusions mais fait aussi apparaître un terme supplémentaire relatif à une fonction statistique de répartition de la phase dispersée.

Le choix des modèles sera dans la suite de ce travail limité aux modèles d'homogénéisation d'ordre 2 qui permettront d'évaluer les propriétés homogénéisées, telles que le module d'Young, la conductivité thermique et électrique. Le recours à un modèle d'ordre supérieur s'avèrerait souvent irréalisable du fait des informations, parfois microstructurales, nécessaires à la prédiction des propriétés homogénéisées.

Ainsi, pour chacun des motifs géométriques intégrés dans la base de données, des modèles d'homogénéisation analytiques d'ordre 2 ont été sélectionnés afin de permettre l'évaluation des propriétés équivalentes nécessaire à la résolution du problème de conception traité par la suite : le module d'Young, la conductivité thermique et la conductivité électrique. Les critères de choix des modèles d'homogénéisation analytiques ont été :

- le nombre de paramètres physiques ou géométriques pris en compte ;
- l'intervalle de validité du modèle ;
- l'erreur engendrée dans l'intervalle de variation des paramètres identifiés.

Afin de minimiser le nombre de variables à traiter dans le problème, le travail s'est appuyé, quand cela était possible, sur l'analogie entre ces trois grandeurs physiques. Cette analogie entre élasticité et conduction thermique, proposée dans le tableau I-4, est

présentée dans de nombreux travaux parmi lesquels le travail d'Hatta et al. [HATTA, 1985] ou encore celui d'Hashin et al. [HASHIN, 1983].

| | |
|-------------------|-----------------------------|
| Elasticité | Conduction thermique |
| Rigidité | Conductivité thermique |
| Contrainte | Flux de chaleur |
| Déformation | Gradient de température |

tableau I-4 : Correspondance entre conduction thermique et élasticité, d'après Hatta et al. [HATTA, 1985]

Le tableau I-5 présente les modèles d'homogénéisation analytiques sélectionnés pour évaluer les propriétés homogénéisées des mousses à cellules ouvertes et fermées. L'ensemble des modèles d'homogénéisation analytiques correspondant à chacun des motifs géométriques de la base de données est présenté en annexe II.

| Classe de motifs géométriques | Motifs géométriques | | Modèles utilisés |
|--------------------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------------------------|
| Motifs géométriques cellulaires | Mousses | cellules cubiques ouvertes | Gibson et Ashby [GIBSON, 1999] |
| | | cellules cubiques fermées | Ashby et Medalist [ASHBY, 1983] |

tableau I-5 : Modèles analytiques utilisés dans l'évaluation des propriétés homogénéisées des mousses à cellules ouvertes et fermées

Le tableau I-6 propose, lui, les paramètres physiques ou géométriques ainsi que les intervalles de validité associés aux motifs des mousses à cellules ouvertes ou fermées. Le lecteur pourra retrouver l'ensemble de ces paramètres pour chacun des motifs de la base de données de motifs géométriques explicité en annexe II.

| Motifs géométriques | | Paramètres du modèle | Intervalle de validité |
|---------------------|-------------------------------|--|-----------------------------|
| Mousses | cellules cubiques ouvertes | t : épaisseur des bords de la cellule l : longueur du côté de la cellule ρ_r : densité relative de la cellule | $0 \leq \rho_r \leq 1$ |
| | cellules cubiques fermées | t_e : épaisseur des bords de la cellule t_f : épaisseur des parois de la cellule l : longueur du côté de la cellule ρ_r : densité relative de la cellule | $0,01 \leq \rho_r \leq 0,3$ |

tableau I-6 : Paramètres et intervalle de validité des modèles analytiques utilisés pour la caractérisation des mousses à cellules ouvertes et fermées

I.4 Conclusion

L'incapacité des matériaux monolithiques à répondre à des exigences toujours plus élevées a imposé aux concepteurs de s'orienter vers des solutions architecturées. Appliquées à ces nouveaux matériaux, les méthodes de conception classiques ont montré leurs limites nécessitant le développement de méthodes de conception adaptées. Face aux nombreux paramètres qui définissent un multimatériau, les études se sont alors appuyées sur des hypothèses, telles que la définition de l'architecture préalable du multimatériau, permettant ainsi de réduire l'hyperchoix que ces nouveaux matériaux proposent. Ce travail s'inscrit dans une volonté de proposer une démarche de conception dans laquelle la sélection de l'architecture et les constituants du multimatériau s'effectue simultanément. La coexistence de différentes échelles au sein d'un multimatériau a imposé la mise en place d'une structuration de son architecture permettant ainsi sa définition complète. La sélection d'un couple architecture/matériaux s'appuie sur une stratégie de recherche libre au sein de bases de données de motifs géométriques élémentaires et de matériaux. La force d'une méthode de conception s'appuyant sur des bases de données réside dans la capacité de ces outils à intégrer et exploiter les caractérisations physiques d'architectures en constant développement. La pertinence de la base de données de motifs géométriques élémentaires est liée à sa capacité à représenter l'architecture d'un multimatériau. L'évaluation des propriétés d'un multimatériau repose sur le compromis entre le choix du nombre de paramètres géométriques considérés dans les modèles d'homogénéisation des motifs et la précision apportée par ces modèles sur la grandeur calculée.

L'étude méthodologique développée dans ce travail de thèse est appliquée à la

conception d'une pièce de packaging d'électronique embarquée dans l'aéronautique. La suite de ce travail portera donc sur la définition du besoin de conception, la définition du cahier des charges de l'application, point de départ du processus de conception.

CHAPITRE II

PRESENTATION DE L'APPLICATION INDUSTRIELLE

La méthode de conception de multimatériaux développée dans ce manuscrit est appliquée au cahier des charges d'une pièce de packaging de l'électronique embarquée dans l'aéronautique. Cette pièce, actuellement fabriquée en alliage métallique, doit à la fois satisfaire une fonction thermique (évacuation de la chaleur dissipée par les composants électroniques), une fonction mécanique (résistance aux vibrations et protection de la carte électronique en cas de crash ou lors des opérations de maintenance) et une fonction de protection électromagnétique. La solution devra permettre un gain de masse de 20 à 40% tout en assurant des performances équivalentes. Le capot supérieur du packaging présente des géométries complexes. Basées sur des validations numériques, des hypothèses vont être présentées visant à proposer une géométrie simplifiée représentative du cas industriel. Ce modèle numérique simplifié doit permettre des temps de calculs acceptables tout en assurant une erreur engendrée maîtrisée.

II PRESENTATION DE L'APPLICATION INDUSTRIELLE

| | |
|---|----|
| II.1 Introduction | 59 |
| II.1.1 Les enjeux des packagings d'électronique embarquée | 59 |
| II.1.2 Quelques exemples de développement de packaging | 60 |
| II.2 Présentation de l'application industrielle | 62 |
| II.2.1 Déclinaison des exigences générales | 64 |
| II.2.2 Déclinaison des fonctions principales | 64 |
| II.3 Analyse et modélisation du capot supérieur | 69 |
| II.3.1 Modélisation des phénomènes thermiques | 70 |
| II.3.2 Modélisation des phénomènes vibratoires et électriques | 80 |
| II.3.3 Implémentation du modèle numérique | 85 |
| II.4 Conclusion | 89 |

II.1 Introduction

L'avionique est une traduction littérale du terme générique américain "avionics", pour désigner l'ensemble des équipements embarqués de type électronique, électrique ou informatique fournissant une aide au pilotage d'un aéronef.

Les systèmes électroniques embarqués représentent une part importante du coût d'un avion : 35 à 40 % d'un avion civil et plus de 50 % d'un avion militaire [BIEBER, 2012]. Ces équipements électroniques sont en constante évolution à bord des avions prenant en charge des fonctions de plus en plus centrales : la gestion du vol, de la trajectoire, les communications... Cette évolution vers toujours plus d'électronique embarquée a rendu les avions plus performants et plus économiques parce que plus automatiques, mais aussi plus réactifs aux sollicitations intérieures ou extérieures. Ainsi, l'électronique embarquée est devenue ces dernières années un des composants central d'un aéronef.

II.1.1 Les enjeux des packagings d'électronique embarquée

Un système électronique embarqué ne peut fonctionner que dans un environnement adapté préservant la survie des composants électroniques. Le packaging assure l'intégrité d'un système électronique lui permettant ainsi d'accomplir les fonctions pour lequel il a été conçu. Le packaging d'électronique est défini comme « l'art et la science d'établir les interconnexions avec l'environnement permettant à des circuits à prédominance électronique de traiter ou de stocker de l'information » [SAINT MARTIN, 2005]. Via une encapsulation du système, le packaging assure l'intégrité physique des composants électroniques et participe à leur protection électrique et électromagnétique.

La multiplication des systèmes électroniques induit naturellement une augmentation du nombre des packagings embarqués à bord des aéronefs. De plus, du fait de l'augmentation des niveaux de puissances des composants électroniques, les packagings sont devenus des éléments majeurs dans la gestion de la dissipation des flux thermiques. L'enjeu est aujourd'hui donc double pour les constructeurs aéronautiques : définir des solutions permettant à la fois d'assumer des cahiers des charges aux niveaux d'exigences toujours plus élevés (thermiquement, mécaniquement...) mais aussi permettant une

réduction significative de la masse. L'incapacité des matériaux métalliques jusqu'ici envisagés à répondre à de telles exigences oblige désormais les constructeurs à s'orienter vers des solutions multimatériaux.

II.1.2 Quelques exemples de développement de packaging

La science du packaging fait intervenir un certain nombre de compétences scientifiques et techniques parmi lesquelles on retrouve la thermique, l'électronique, la mécanique ou encore la science des matériaux. Face aux nouveaux défis que représentent les packagings d'électronique embarquée, les travaux académiques [POPOVA, 2005 ; YU, 2005] se sont intéressés à la compréhension des différents phénomènes physiques, majoritairement thermiques, qui interviennent dans le packaging d'un système électronique embarqué. En réponse aux nouveaux défis que représente l'évacuation thermique de composants dissipant toujours plus, différents dispositifs peuvent être adoptés.

Les ailettes, tout comme les picots, représentent un premier type de dispositif largement utilisé dans les systèmes de dissipation thermique. Via l'augmentation de la surface d'échange, les ailettes et les picots permettent une augmentation des transferts de chaleur par convection. Ainsi, de nombreuses études se sont attachées à la compréhension et à la modélisation des phénomènes de transfert de chaleur, cherchant à proposer une amélioration des géométries des surfaces d'échange convectif. Parmi elles, l'étude de Yu et al. [YU, 2005] propose par exemple la comparaison d'une plaque recouverte d'ailettes avec une plaque recouverte d'ailettes auxquels ont été ajoutés des picots (figure II-1). Les auteurs montrent que l'insertion de picots aux travers de rangée d'ailettes permet d'améliorer les échange convectifs de près de 30 % dans des conditions de ventilations identiques.

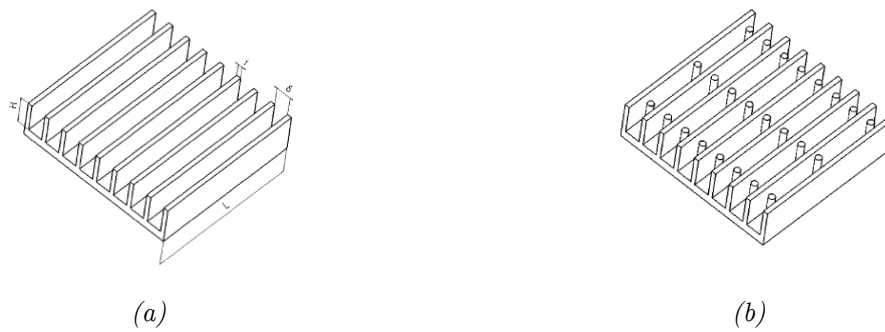


figure II-1 : Plaque recouvertes (a) d'ailettes (b) d'ailettes + picots, selon [YU, 2005]

Une autre solution peut être de choisir un dispositif s'appuyant sur des systèmes de refroidissement mécaniques basés sur l'utilisation de fluides caloporteurs. En ce sens, le travail de Popova et al. [POPOVA, 2005] propose l'étude expérimentale et numérique du comportement thermique d'un packaging 3D, packaging défini par un empilement de plusieurs substrats. Les auteurs y exposent un packaging basé sur un refroidissement par caloducs plats démontrant que l'utilisation d'un fluide caloporteur permet d'améliorer sensiblement les transferts de chaleur.

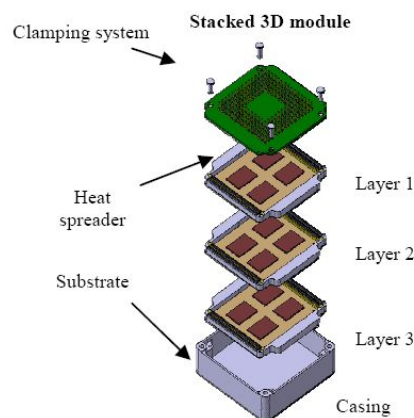


figure II-2 : Packaging étudié dans les travaux de Popova et al. [POPOVA, 2005]

Après avoir rappelé que la première cause de dysfonctionnement d'un circuit électronique est le dépassement de la température critique de service d'un des composants, les travaux d'Ivanova et al. [IVANOVA, 2006] proposent une étude d'un packaging d'électronique embarquée également basé sur le refroidissement du système électronique à l'aide de caloducs.

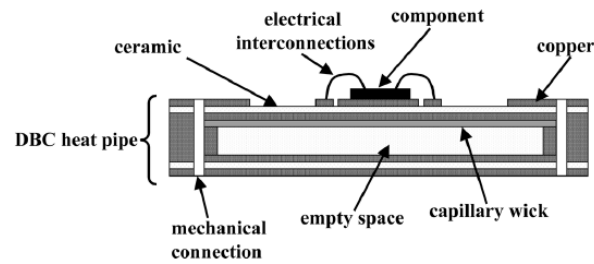


figure II-3 : Packaging étudié dans les travaux d'Ivanova et al. [IVANOVA, 2006]

Enfin, le concepteur peut décider de s'appuyer sur des dispositifs de refroidissement basés sur les propriétés des matériaux. Par exemple, l'utilisation de matériaux ayant une température de changement de phase appropriée et une importante chaleur latente permet d'absorber de la chaleur en stabilisant la température d'un équipement. Le travail de Gharbi et al. [GHARBI, 2015] propose par exemple une étude des propriétés thermophysiques de différents matériaux à changement de phase. Les auteurs concluent ainsi que ce type de matériaux associés à des ailettes constitue un système de contrôle thermique efficace.

Les exemples précédemment présentés sont focalisés sur la satisfaction d'une fonction de dissipation thermique. Dans cette étude, le packaging devra également satisfaire des fonctions mécaniques et électromagnétiques qui seront présentées par la suite.

II.2 Présentation de l'application industrielle

La pièce étudiée dans ce manuscrit est le capot supérieur d'un boîtier (figure II-4) situé dans la baie avionique, partie de l'avion dédiée au stockage d'armoires regroupant un nombre important d'équipements électroniques. Ses dimensions sont précisées tableau II-1.

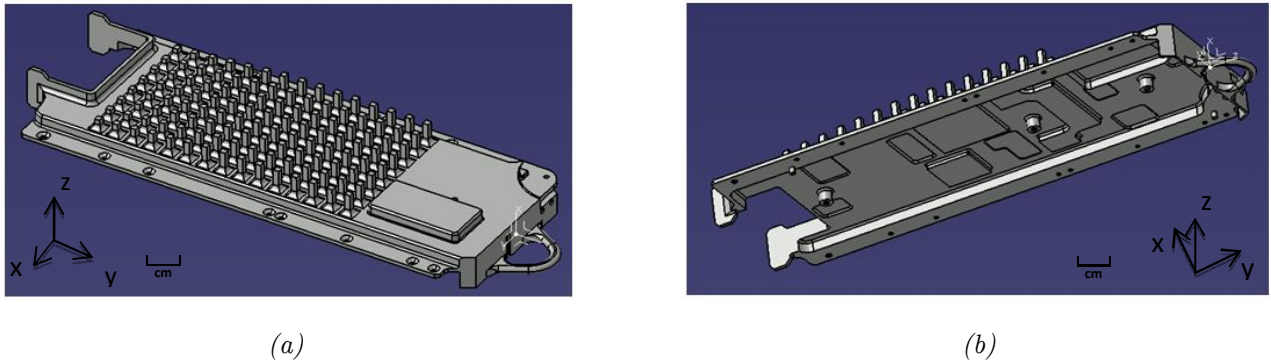


figure II-4 : Représentation de la pièce cas d'étude (a) vue de dessus, (b) vue de dessous

La pièce concernée assure la protection des cartes électroniques contre les chocs et les vibrations. Elle contribue au blindage électromagnétique, assure une mise à la masse électrique et assure la dissipation de la chaleur pour que les composants électroniques n'atteignent pas leurs températures maximales de service.

| | |
|---|--------|
| Largeur (en x) | 103 mm |
| Longueur (en y) | 247 mm |
| Epaisseur (en z) (hors bossages et picots) | 2 mm |

tableau II-1 : Dimensions caractéristiques du capot supérieur

Cette pièce est une pièce massive en alliage d'aluminium A (dont les propriétés sont récapitulées dans le tableau II-2) usinée dans la masse.

| Propriétés | Valeur |
|--|---------------------|
| Masse volumique (kg/m^3) | 2780 |
| Conductivité thermique λ (W/m.K) | 140 |
| Capacité calorifique (J/kg.K) | 897 |
| Module d'Young (Pa) | $71 \cdot 10^9$ |
| Résistivité électrique ($\Omega \cdot \text{m}$) | $4,3 \cdot 10^{-8}$ |

tableau II-2 : Propriétés de l'alliage d'aluminium A utilisé

Le cahier des charges est formulé par la suite en fonction de trois types d'informations :

- l'objectif de conception ;
- les exigences générales de la pièce ;
- les fonctions principales de la pièce.

La masse du capot supérieur présenté ci-dessus est de 155g et sera considérée comme la masse de référence. Le cahier des charges comprend une astreinte de réduction de cette masse de 20%. La classification se fera par la suite par rapport à un objectif de minimisation de la masse du capot.

II.2.1 Déclinaison des exigences générales

Le capot supérieur doit satisfaire un grand nombre de spécifications afin d'être approuvé pour une utilisation aéronautique. Les exigences générales sont articulées autour d'astreintes interactives. Les astreintes interactives définissent les exigences qui lient la pièce à son environnement. Elles sont intrinsèquement liées aux propriétés du matériau et sont de différentes natures :

- le boîtier doit dépasser 150000 heures de fonctionnement sur 25 ans ;
- le boîtier doit pouvoir subir un cycle en température ambiante d'une amplitude de $[-70^{\circ}\text{C} ; 100^{\circ}\text{C}]$ avec des variations supérieures à $5^{\circ}\text{C}/\text{minute}$;
- le boîtier doit supporter l'humidité (environnement humide sévère) ;
- le boîtier doit utiliser un matériau qui ne favorise pas la croissance de champignons ;
- le matériau utilisé doit être auto-extinguible et le boîtier doit supporter l'application d'une flamme de 1100°C pendant 5 minutes ;
- le matériau doit résister à la corrosion ;
- les matériaux utilisés ne doivent pas occasionner un couplage galvanique entre les éléments du boîtier ou entre ces éléments et la baie avionique.

II.2.2 Déclinaison des fonctions principales

Trois fonctions principales ont été identifiées dans le cahier des charges :

- thermique : le packaging assure l'évacuation de la chaleur dissipée par les composants électroniques ;
- mécanique : le packaging assure l'intégrité physique de la carte électronique

et les jeux fonctionnels entre la carte et le capot ;

- électromagnétique : le packaging assure un blindage électromagnétique et une mise à la masse.

Dans un premier temps, la construction de la démarche de conception proposée se concentrera sur les fonctions principales. Il sera par la suite présenté dans la dernière partie du chapitre 4 une démarche permettant la prise en compte des exigences générales dans la méthode de conception développée.

II.2.2.1 Déclinaison de la fonction thermique

Le capot supérieur, soumis à différents flux thermiques, doit permettre leur dissipation pour assurer un bon fonctionnement des composants électroniques. Des composants électroniques sont fixés sur le Printed Circuit Board (PCB), représenté en vert sur la figure II-5, et dissipent de la chaleur pendant leur phase de fonctionnement. Chacun des composants possède une température maximale d'utilisation spécifiée dans les données du constructeur. Comme présenté dans le travail d'Ivanova [IVANOVA, 2006], le dépassement de la température critique de service d'un des composants constitue la première cause de dysfonctionnement des circuits électroniques. Les composants qui dissipent le plus de chaleur sont en contact avec le capot de manière à favoriser l'échange de chaleur avec cette partie du boîtier. Le critère de satisfaction thermique est donc celui du non-dépassement des températures critiques en des points de contact entre le capot supérieur et les composants électroniques.

Le PCB possède sept processeurs sur sa face extérieure, et tous ne sont pas en contact direct avec le capot supérieur. Les puissances dissipées par les principaux processeurs sont données dans le tableau II-3.

| Processeur | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|------------------------|----|------|------|-----|-----|-------|------|
| Puissance dissipée (W) | 10 | 0,29 | 0,42 | 0,9 | 0,9 | 0,615 | 0,92 |

tableau II-3 : Puissances dissipées par les principaux processeurs situés sur la face externe du PCB

Le processeur 1 dissipe à lui seul près de 72 % de la puissance totale dissipée par les sept processeurs. Celui-ci est situé au centre du PCB et sera considéré comme référence. Sa température maximale d'utilisation est fixée à 90°C. Cette température

$T_{ref} = 90^{\circ}C$ peut être définie comme le niveau d'exigence de l'astreinte thermique.

Une vue en coupe dans le plan de la pièce dans son environnement ainsi que les flux thermiques identifiés est représentée en figure II-5.

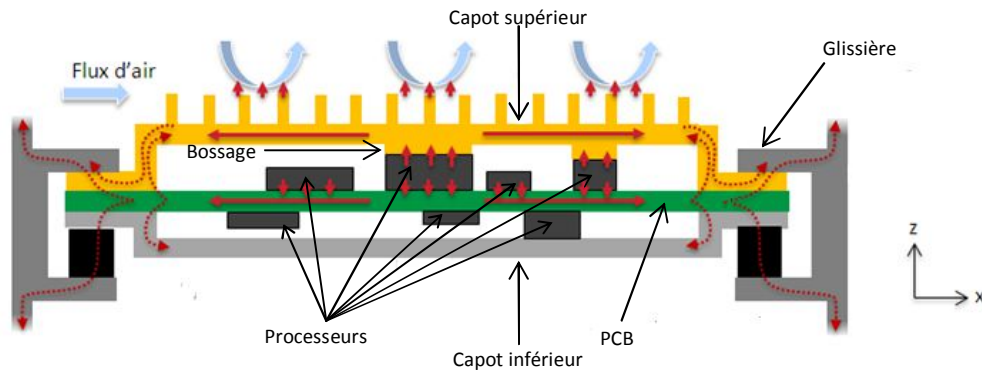


figure II-5 : Vue en coupe du capot supérieur dans son environnement et représentation des flux thermiques

Plusieurs chemins thermiques peuvent être identifiés, la chaleur dissipée par les composants pouvant être évacuée à la fois par :

- conduction : dans le plan du PCB vers les glissières, dans le plan du capot supérieur vers les glissières, à travers l'épaisseur du capot supérieur ;
- convection : un flux d'air forcé est parallèlement dirigé sur la face externe du capot supérieur présentant de nombreux picots pour favoriser l'échange convectif ;

Le capot supérieur présente différentes zones fonctionnelles qui permettent la dissipation des flux thermiques :

- sur sa face interne, les bossages qui sont en contact direct avec certains composants de forte puissance pour permettre l'évacuation de chaleur par conduction provenant des composants ;
- à ses extrémités gauche et droite, les surfaces de contact du capot avec les glissières permettent d'un point de vue thermique :
 - ✓ l'échange de chaleur avec le PCB par conduction ;
 - ✓ l'évacuation de chaleur par conduction dans la structure de l'armoire elle-même refroidie par convection ;

- sur sa surface externe, de nombreux picots favorisent l'évacuation de la chaleur par convection.

II.2.2.2 Déclinaison de la fonction mécanique

L'enjeu principal de cette astreinte vibratoire est d'imposer des fréquences de résonance au boîtier différentes des fréquences d'excitation. Les fréquences de résonance du boîtier doivent être suffisamment élevées pour que les fréquences non filtrées par les amortisseurs entraînent la résonance de la carte électronique. Les fréquences de résonance dépendent des conditions aux limites, de la géométrie et des dimensions du capot supérieur mais aussi des propriétés du matériau. Par exemple, l'expression de la fréquence de résonance d'une plaque plane isotrope peut être donnée par :

$$f_{11} = X \sqrt{\frac{D}{\rho e}} \quad (\text{II-1})$$

où

$$D = \frac{E e^3}{12(1-\nu^2)} \quad (\text{II-2})$$

avec X : facteur dépendant des conditions aux limites et des dimensions de la plaque

e : Epaisseur de la plaque (m)

D : Rigidité en flexion de la plaque (N.m)

ρ : Masse volumique (kg/m^3)

E : Module d'Young du matériau (Pa)

ν : Coefficient de Poisson du matériau

Les phénomènes de mécanique vibratoire sont généralement traités par éléments finis dès que la géométrie n'est pas élémentaire ou lorsque les matériaux utilisés sont anisotropes. Dans le paragraphe II.3.2, nous étudierons l'influence des éléments géométriques tels les picots, les bossages et les glissières sur la fréquence de vibration du premier mode propre du capot supérieur. Pour la recherche d'un multimatériau, l'astreinte vibratoire imposée a été ramenée à l'analyse d'une plaque plane de dimensions 247x103x2mm dont la fréquence de vibration doit être supérieure à 500 Hz.

II.2.2.3 Déclinaison de la fonction électromagnétique

Le blindage électromagnétique assuré par le boîtier protège la carte électronique contre les effets de certains couplages électromagnétiques. Il permet d'accroître l'immunité électromagnétique de l'équipement. L'efficacité des blindages électromagnétiques est principalement évaluée à partir du calcul de l'atténuation du blindage. L'atténuation peut être décomposée en trois composantes : l'atténuation par réflexion, l'atténuation par absorption et l'atténuation par réflexions multiples. Le facteur total de blindage, c'est-à-dire l'atténuation totale, peut être défini comme la somme de ces trois composantes. Chacune des composantes de cette atténuation totale est exprimée en fonction de la conductivité électrique (ou résistivité électrique) du matériau qui constitue le blindage.

Le capot supérieur doit aussi protéger l'électronique embarquée contre le risque de foudre. Cette protection nécessite une mise à la masse du capot supérieur. Pour cela, une résistance électrique maximale est définie en fonction du chemin que doit parcourir un courant dans l'épaisseur du boîtier pour arriver à un conducteur de masse.

Si cette astreinte électrique est satisfaite par un multimatériau ayant une faible résistivité électrique, ce qui est supposé dans cette étude, alors la protection par blindage électromagnétique sera assurée.

L'astreinte de blindage électromagnétique va être ramenée pour la suite du travail à une astreinte de résistance électrique.

Le cahier des charges définit que la résistance électrique entre les bords de la plaque qui ne sont pas en contact avec les glissières doit être inférieure à $2 \cdot 10^{-3} \Omega$. Cette résistance électrique est calculée à partir des dimensions du capot supérieur par :

$$R_{elec} = \frac{\rho_e \cdot a}{e \cdot b} \quad (\text{II-3})$$

avec R_{elec} : Résistance électrique (Ω)

ρ_e : Résistivité électrique du matériau (Ω/m)

e : Epaisseur de la plaque (m)

a : Longueur de la plaque (m)

b : Largeur de la plaque (m)

II.3 Analyse et modélisation du capot supérieur

L'objectif principal de cette partie est d'élaborer un modèle représentatif du comportement du capot supérieur dans les conditions de sollicitations précédemment définies. La définition du modèle passe par une réflexion sur :

- les phénomènes physiques mis en jeu et la façon dont ils doivent être pris en compte et modélisés ;
- la représentation de la géométrie du capot supérieur et son éventuelle simplification ;

Nous montrerons que la modélisation retenue nécessite une résolution numérique avec un code éléments finis. Une étude du choix des éléments finis et de la richesse du maillage sera effectuée.

La géométrie globale du capot peut être représentée par une plaque plane sur laquelle sont ajoutés différents éléments (figure II-6) :

- des picots sur sa partie supérieure permettant de favoriser les transferts de chaleur par convection ;
- des bossages sur sa partie inférieure afin d'approcher le capot supérieur au plus près des composants électroniques et favoriser le transfert de chaleur par conduction de ces composants vers le capot ;
- des surfaces réalisant une liaison glissière entre le capot et l'armoire principale afin d'assurer le positionnement du boîtier dans l'armoire. Ces surfaces seront appelées dans la suite du document « bords d'interface glissières ».

L'objectif de cette partie est d'élaborer un modèle de comportement représentatif de la pièce étudiée dans les conditions de sollicitations identifiées tout en étant compatible avec une démarche de conception d'un multimatériau ayant une architecture multicouche.

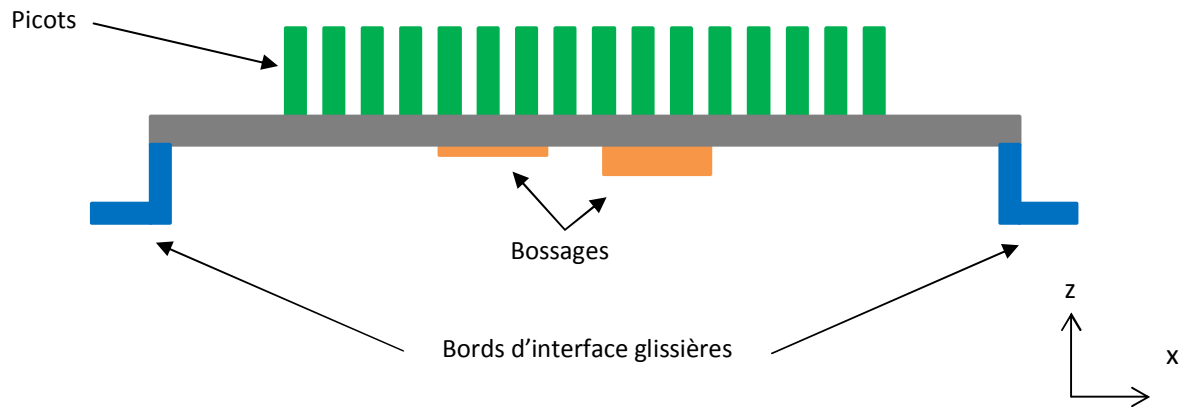


figure II-6 : Sous-ensembles identifiés du capot

Pour chaque détail géométrique identifié, l'influence des modélisations proposées sur les grandeurs physiques étudiées va être évaluée à partir de simulations par éléments finis. Les simulations numériques thermiques et vibratoires sont effectuées à partir du logiciel Abaqus[®], le calcul de la résistance électrique est lui traité de façon analytique.

Les résultats issus de ces simulations numériques seront comparés aux résultats obtenus à partir d'un modèle numérique de référence. Ce modèle est constitué d'éléments solides quadratiques avec un maillage fortement affiné (éléments cubiques de côté 1mm), possédant les dimensions du capot supérieur fournies dans le cahier des charges ainsi que les propriétés matériaux de l'alliage métallique A (figure II-7).

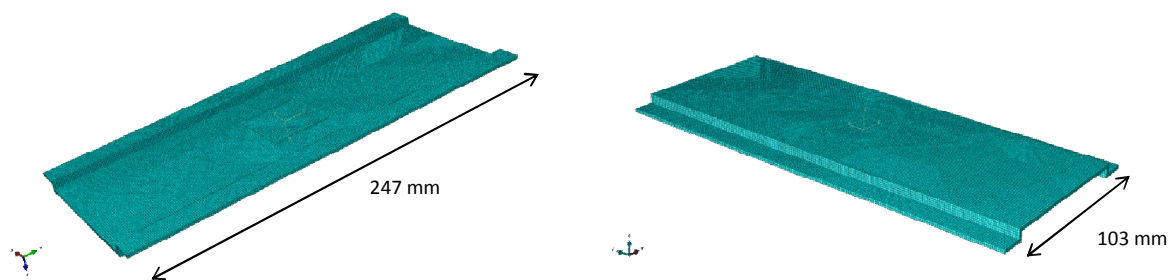


figure II-7 : Modèle numérique utilisé pour la comparaison des résultats

II.3.1 Modélisation des phénomènes thermiques

Le capot est soumis à différentes sollicitations thermiques et interactions avec l'environnement d'utilisation. Sur sa face interne, le capot supérieur est soumis à des échanges par conduction provenant du composant électronique principal en contact, mais aussi à des échanges convectifs avec les composants électroniques qui ne sont pas en

contact avec le capot. La face externe de la pièce est ventilée par un flux d'air entraînant un échange convectif. Un flux thermique s'évacue également par conduction au niveau de chacune des glissières vers l'armoire principale.

Le processeur pris en compte dans cette étude (processeur le plus dissipatif), possède une surface considérée carrée de 10 cm^2 au centre de la face interne du capot supérieur. Ce processeur dissipe une puissance de 10 W . Une densité de flux de 1 W/cm^2 est donc imposée au centre de la face interne sur une surface de 10 cm^2 . Un flux surfacique auxiliaire de $0,002 \text{ W/cm}^2$ est également imposé sur le reste de la surface de la face interne du capot de manière à considérer les flux thermiques dissipés par les composants sans contact direct.

L'influence des phénomènes radiatifs est évaluée à partir du relevé des températures sur la face interne du capot en utilisant deux modèles numériques : l'un avec prise en compte du rayonnement et l'autre sans. Négliger ces phénomènes engendre une erreur inférieure à 1% au niveau de la température relevée au centre de la face interne. Les phénomènes de rayonnement seront donc considérés comme négligeables dans la suite de ce travail. Sur la puissance totale dissipée par la carte électronique, un bilan des flux évacués permet d'estimer que seulement approximativement 8% des flux sont dissipés par rayonnement [AIRBUS, 2013].

II.3.1.1 Modélisation des picots

Les picots représentent des éléments essentiels du capot supérieur. Ils participent en effet significativement à la dissipation de chaleur créant ainsi un chemin thermique privilégié au sein du capot. La suite de l'étude va proposer leur prise en compte à l'aide d'un coefficient d'échange convectif équivalent appliqué sur la surface externe du capot supérieur (figure II-8).

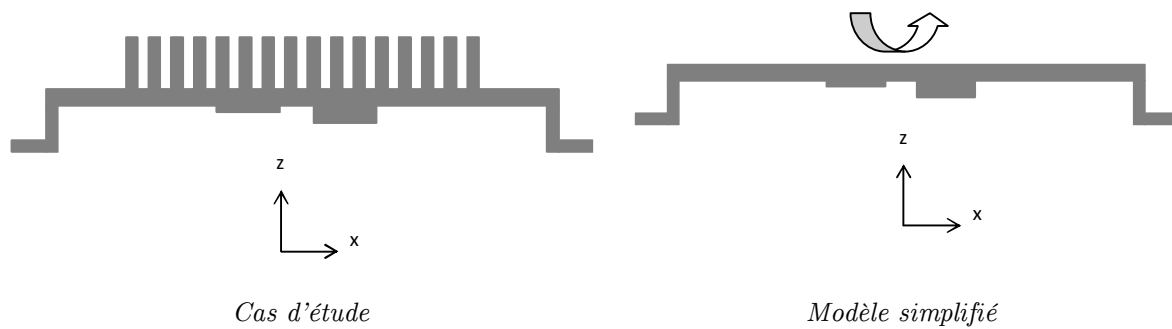


figure II-8 : Suppression des géométries picots

On souhaite prendre en compte l'échange convectif associé à la présence des picots sans être obligé de les représenter explicitement. Pour cela, nous cherchons à déterminer un coefficient d'échange convectif équivalent qui sera utilisé dans l'expression des conditions aux limites sur la face supérieure d'une plaque plane. L'évaluation de ce coefficient d'échange équivalent dépend :

- de la densité de picots, 1 picot par cm^2 dans le cas du capot ;
- des dimensions des picots (section carrée de côté 3 mm, hauteur de 10 mm) ;
- des conditions de température et de ventilation. La surface supérieure du capot est ventilée par un flux d'air tangent à sa surface avec une vitesse $v=2,5$ m/s. La température ambiante au sein de l'armoire dans laquelle le capot est stocké est estimée à 59°C .

Afin de simplifier l'étude, les modélisations proposées considèrent que tous les picots ont la même géométrie. Ce coefficient d'échange peut être calculé en considérant l'augmentation de la surface d'échange convectif apportée par les picots et la capacité convective d'un picot aux dimensions précédemment définies [KHAN, 2008]. A partir de ce modèle, nous trouvons un coefficient d'échange équivalent de $51 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ ce qui est très proche des $50 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ estimés par Airbus. Dans la démarche de conception d'un multimatériau mise en place dans ce travail, le coefficient d'échange équivalent sera calculé à partir des dimensions des picots ou des ailettes et des propriétés thermiques du matériau constitutif du motif géométrique spécifique utilisé (ailettes ou picots).

Une étude a été menée par les constructeurs et a consisté à déterminer le champ de

température au sein du capot supérieur pour 3 modèles différents [AIRBUS, 2013] :

- un modèle de référence représentant l'ensemble de l'équipement, construit avec le logiciel Flowtherm[®], figure II-9a. Avec ce modèle, les éléments géométriques du capot (picots, glissières, bossages) sont explicitement représentés.
- un modèle fluide simplifié dans lequel les picots ne sont pas explicitement représentés. Les transferts de chaleur associés aux picots sont modélisés par un coefficient de convection équivalent avec le logiciel Flowtherm[®], figure II-9b ;
- un modèle sans fluide dans lequel les picots ont aussi été supprimés et remplacés par un coefficient de convection équivalent toujours avec le logiciel Flowtherm[®], figure II-9c.

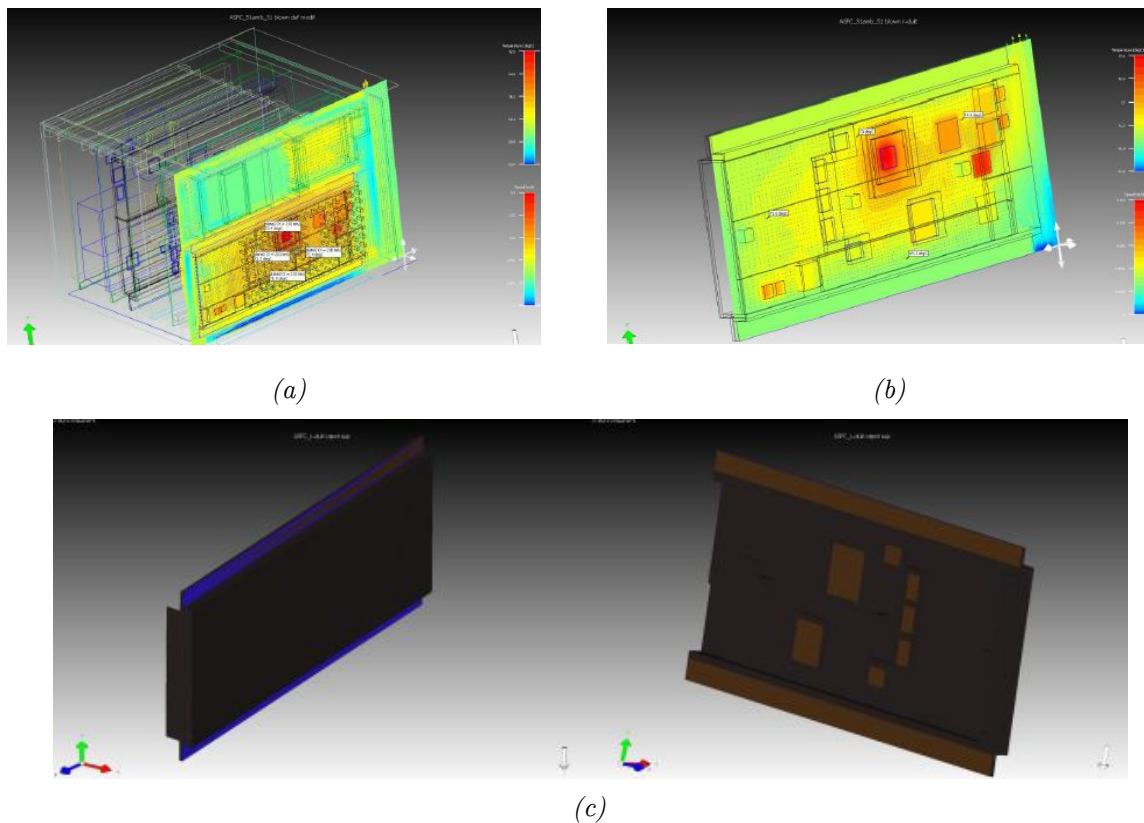


figure II-9 : Comparaison entre modèles (a) simulation d'ensemble , (b) modèle simplifié, (c) abaqus, d'après [AIRBUS, 2013]

Les résultats de ces comparaisons montrent des écarts inférieurs à 4°C sur la

cartographie thermique du capot supérieur entre les trois modèles utilisés. Cet écart de 5% sur les températures relevées est considéré comme acceptable au regard de la phase de conception préliminaire dans laquelle cette étude se place justifiant l'utilisation d'un coefficient d'échange convectif équivalent pour modéliser l'influence de picots sur les phénomènes thermiques.

Il a été montré précédemment que les picots pouvaient être modélisés dans les simulations thermiques à partir d'un coefficient d'échange convectif équivalent. La démarche de conception développée dans ce manuscrit s'appuie sur la construction de multimatériaux aux architectures multicouches. L'étude se propose alors de considérer les motifs géométriques spécifiques à la dissipation thermique (ailettes et picots) comme des couches homogènes (figure II-10). Il est donc nécessaire de définir des propriétés homogénéisées d'un volume représentatif de ces motifs. Ces propriétés seront celles de la couche homogène. Cette couche aura pour épaisseur la hauteur des picots ou des ailettes.

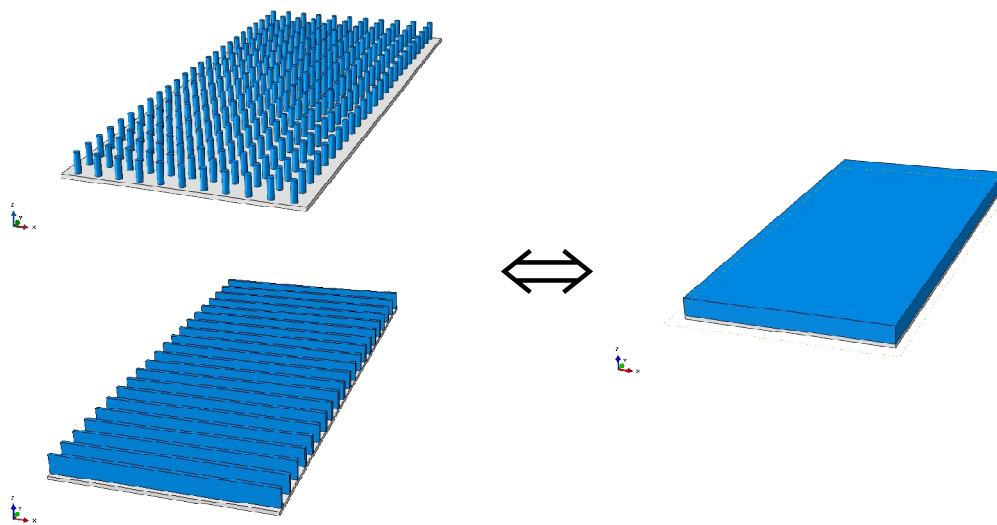


figure II-10 : Homogénéisation des couches « picots » et « ailettes »

Nous avons vu précédemment que la prise en compte des picots dans les phénomènes thermiques pouvait être réalisée à partir d'un coefficient convectif équivalent appliqué à la face supérieure de la couche sur laquelle les picots sont placés. Si les picots sont représentés par une couche, cela implique le transfert des champs de température de la face inférieure de cette couche à la face supérieure (figure II-11). Cela impose donc d'affecter à la couche représentant les picots une conductivité thermique infinie dans

l'épaisseur. Le coefficient d'échange convectif équivalent calculé à l'aide des modèles analytiques présenté au chapitre 1 peut être alors appliqué sur la face externe de la couche supérieure. Ce raisonnement est également applicable au cas d'un motif géométrique de type ailette.

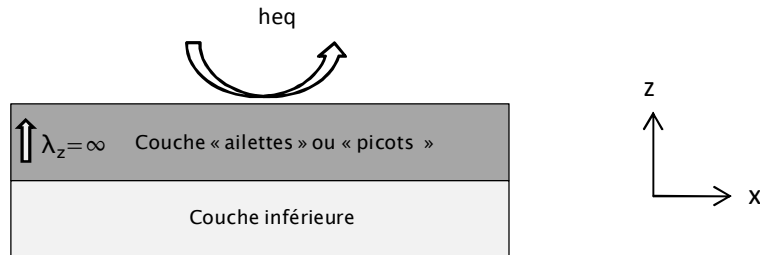


figure II-11 : Modélisation d'une couche « ailettes » ou « picots »

La figure ci-dessous permet de valider la modélisation des picots par une couche homogène. Sur la figure II-12a, les picots sont modélisés par un coefficient d'échange convectif équivalent tandis que la figure II-12b montre la modélisation des picots par une couche homogène sur laquelle le même coefficient d'échange convectif est appliqué.

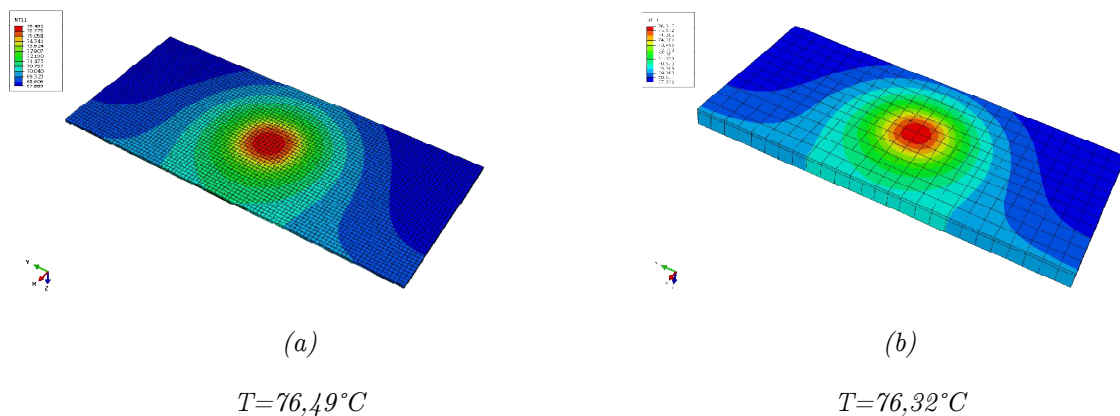


figure II-12 : Champ de température au sein du capot

L'écart engendré sur la température au centre de la face interne est inférieure à 1°C. Cette modélisation sera donc jugée acceptable et adoptée dans la suite de ce travail.

II.3.1.2 Modélisation des bossages et des bords d'interface glissières

Les bossages sont des drains thermiques. Ils viennent en contact avec les composants les plus dissipatifs et se trouvent à l'origine des principaux flux de conduction thermique. Au vu de leurs dimensions vis-à-vis du capot supérieur, la modélisation mise en

place va proposer la suppression des bossages (figure II-13).

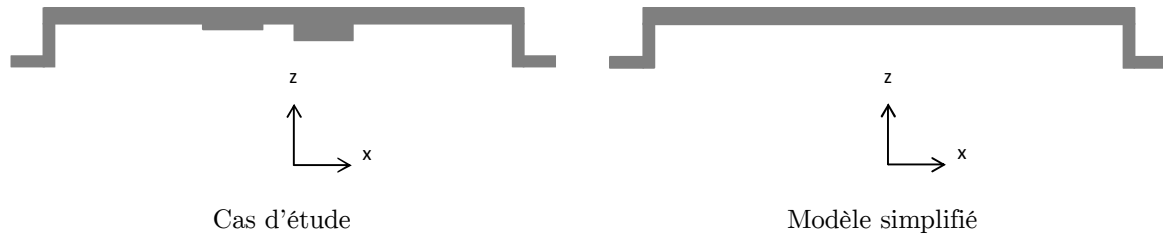


figure II-13 : Modélisation des bossages

Les bossages présentent une surface importante pour une faible hauteur, les résistances de conduction thermique dans l'épaisseur du capot associées à chaque bossage sont négligeables. En effet, les matériaux utilisés pour les bossages ont une conductivité thermique très élevée donc l'apport local de matière n'entraîne qu'une faible augmentation de la résistance de conduction. De plus, les résistances de conduction thermique sont négligeables par rapport aux résistances de convection thermique mises en jeu sur la surface supérieure du capot.

Les bords des interfaces glissières peuvent être aplatis comme illustré figure II-14. En effet, cela ne modifie pas significativement les chemins de conduction vers les glissières mais entraîne une augmentation de la largeur de la plaque équivalent liée à l'ajout de 5 mm supplémentaires de chaque côté de la plaque.

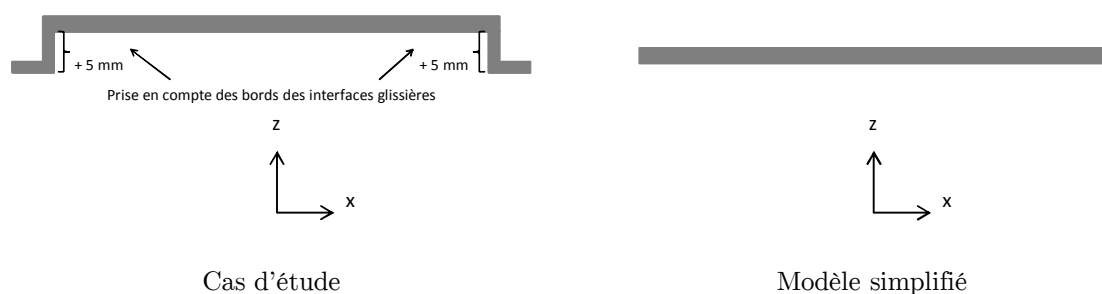


figure II-14 : Modélisation des bords d'interface glissières

Les échanges thermiques par conduction au niveau des bords d'interface glissières dépendent de la capacité de la chaleur dissipée par les composants à s'évacuer par les glissières.

La densité de flux peut être définie par :

$$\phi = \frac{1}{R_{glissière}} (T_{capot} - T_{armoire}) \quad (\text{II-4})$$

avec ϕ : densité de flux (W/m^2)

A : Surface de recouvrement des glissières (m^2) (surface de contact capot/armoire)

$R_{glissière}$: Résistance de contact à l'interface capot/glissière ($\text{K}\cdot\text{m}^2/\text{W}$)

T_{capot} : Température à la surface du capot au niveau des glissières (K)

$T_{armoire}$: Température à la surface de l'armoire au niveau des glissières (K)

Des résistances de contact et des températures d'échanges imposées définissent les transferts de chaleur par conduction entre le capot et l'armoire générale au niveau des glissières. Une résistance de contact induite à l'interface capot/glissière $R'_{glissière}$ est estimée à $0,3 \text{ K}/\text{W}$. La surface de contact entre le capot et l'armoire principale au niveau d'une glissière est de $1,87 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$. La résistance de contact à l'interface capot/glissière $R_{glissière}$ peut être alors calculée à partir de la relation :

$$R_{glissière} = R'_{glissière} \cdot A \quad (\text{II-5})$$

Cette résistance de conduction, calculée à $0,56 \cdot 10^{-3} \text{ K}\cdot\text{m}^2/\text{W}$ sera modélisée par l'application d'un coefficient d'échange convectif équivalent calculé à partir de l'équation (II-6) :

$$h_{eq} = \frac{1}{R'_{glissière} \cdot A} = \frac{1}{R_{glissière}} \quad (\text{II-6})$$

Ainsi un coefficient d'échange convectif équivalent $h_{eq} = 1800 \text{ W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$ sera appliqué sur les surfaces d'échange des bords des interfaces glissières. Il est intéressant de noter que cette résistance de conduction est 40 fois inférieure à la résistance surfacique de dissipation par convection estimée sur la face externe du capot supérieur. L'évacuation de la chaleur dissipée par les composants électroniques se fait principalement par l'intermédiaire des picots.

Le champ de température de l'armoire au niveau des glissières est supposé uniforme. Les données fournies par une simulation de l'ensemble de la baie avionique contenant plusieurs boîtiers permettent l'évaluation d'une température de 70°C pour l'une des glissières et de 68°C pour l'autre [AIRBUS, 2013].

D'un point de vue de la modélisation, aplatir les bords d'interface des glissières impacte directement l'application des conditions aux limites (figure II-15).

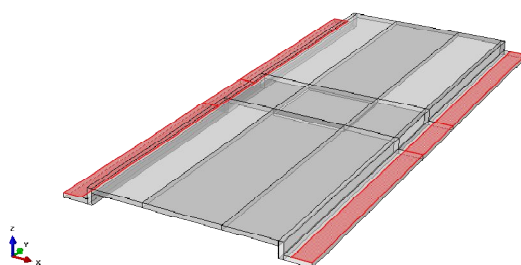


figure II-15 : Surface de contact entre le capot et l'armoire au niveau des glissières

Le coefficient d'échange convectif équivalent est alors modifié proportionnellement à la variation de surface d'application des conditions aux limites. L'erreur engendrée par cette proposition peut être estimée en comparant les champs de températures obtenus avec les deux modèles géométriques, avec les bords d'interface glissières (figure II-16) et sans les bords d'interface glissières (figure II-17).

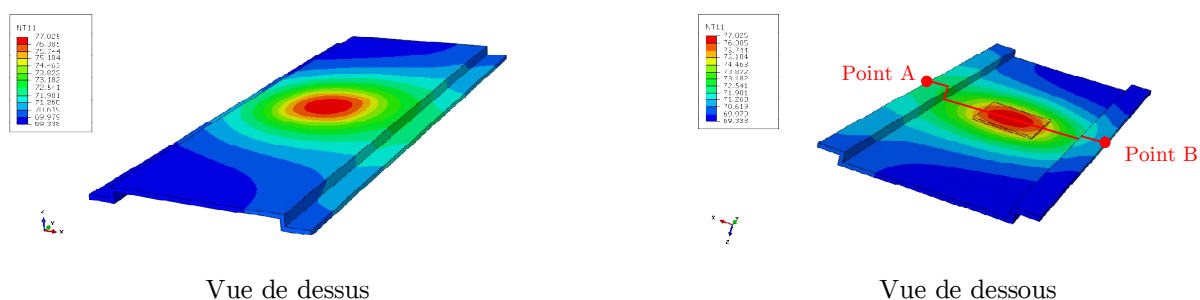


figure II-16 : Simulation thermique effectuée sur le modèle, avec bossage central et avec les bords d'interface glissières

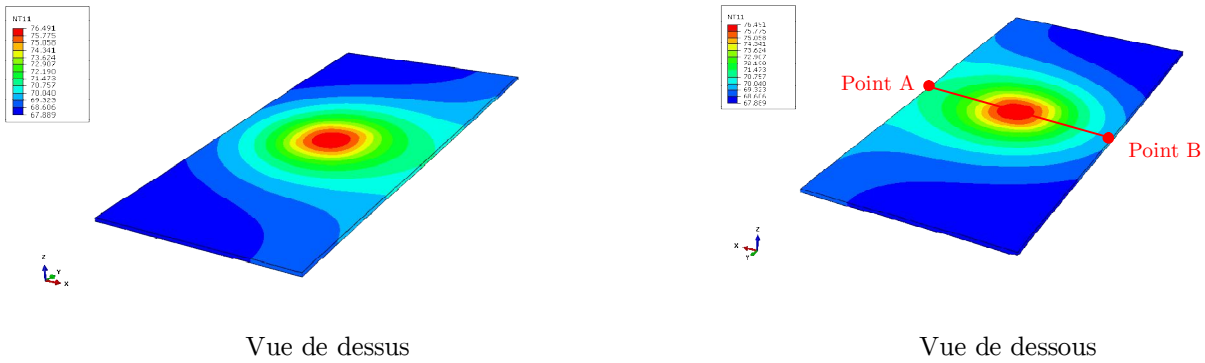


figure II-17 : Simulation thermique effectuée sur le modèle, sans bossage central et sans les bords d’interface glissières

L’évolution de la température à travers l’épaisseur de la plaque relevée en son centre pour les deux modélisations, avec et sans bords d’interface glissière (figure II-18), ne présente pas de différence significative. L’écart observé sur les deux champs de température est inférieure à 1%.

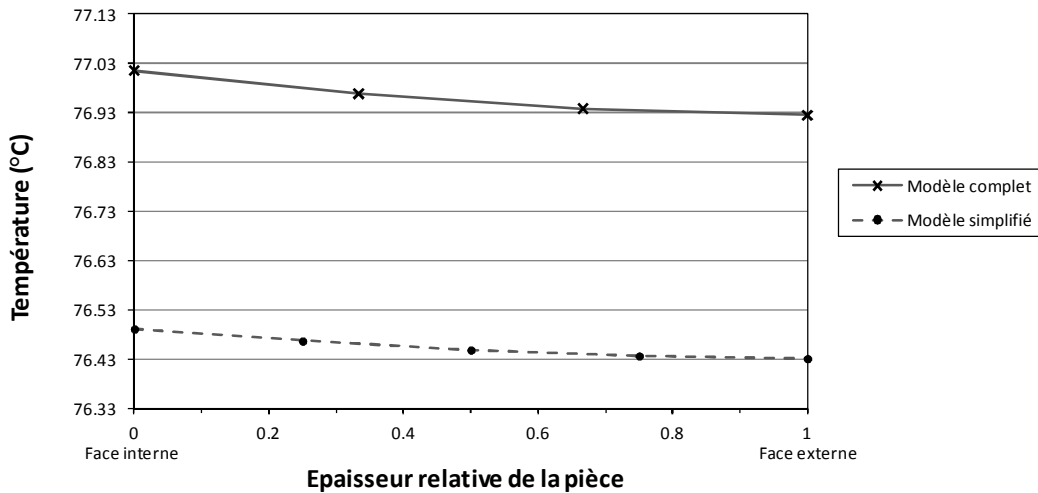


figure II-18 : Evolution de la température au sein de l’épaisseur de la plaque à géométrie complète et simplifiée

La comparaison des températures relevées sur un chemin parcourant la face interne des deux géométries d’une glissière à l’autre du capot est présentée figure II-19 . La figure montre des écarts de température au centre de la plaque sur la courbe représentant la géométrie complète liés à la présence des glissières et du bossage central. L’écart sur les températures relevées en tout point d’un chemin étudié entre les deux modèles est

inférieur à 5%.

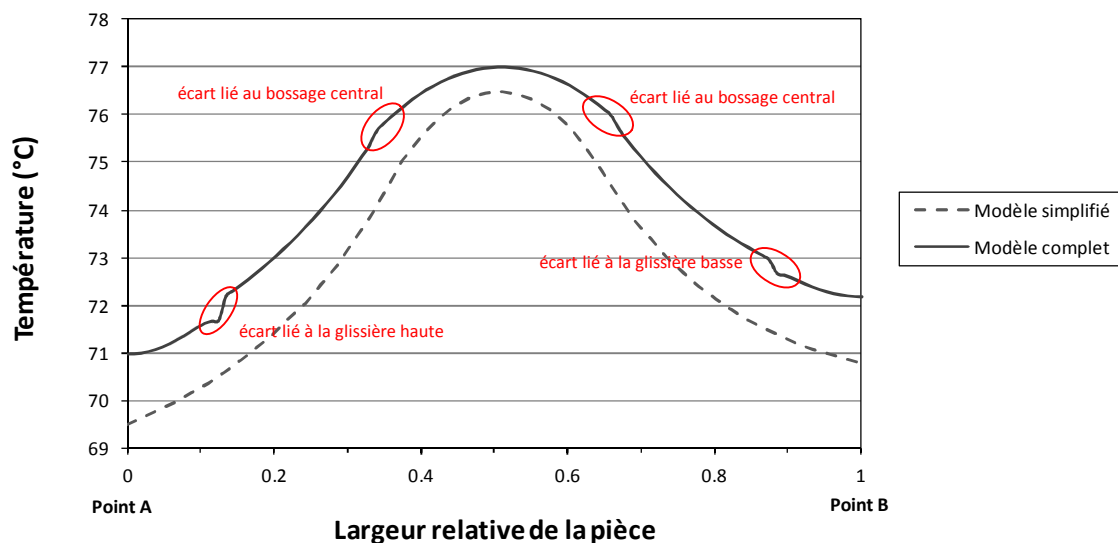


figure II-19 : Evolution de la température de la plaque à géométrie complète et simplifiée

II.3.2 Modélisation des phénomènes vibratoires et électriques

La suite de l'étude va à présent se concentrer sur la prise en compte des sous-ensembles identifiés sur la modélisation des phénomènes vibratoires et électriques.

II.3.2.1 Modélisations des picots

D'un point de vue vibratoire, les picots vont impacter la fréquence de vibration du 1^{er} mode. Pour comprendre l'influence des picots sur cette fréquence de vibration du 1^{er} mode, deux plaques, une non recouverte de picots (figure II-20a) et une recouverte de picots (figure II-20b), sont étudiées.

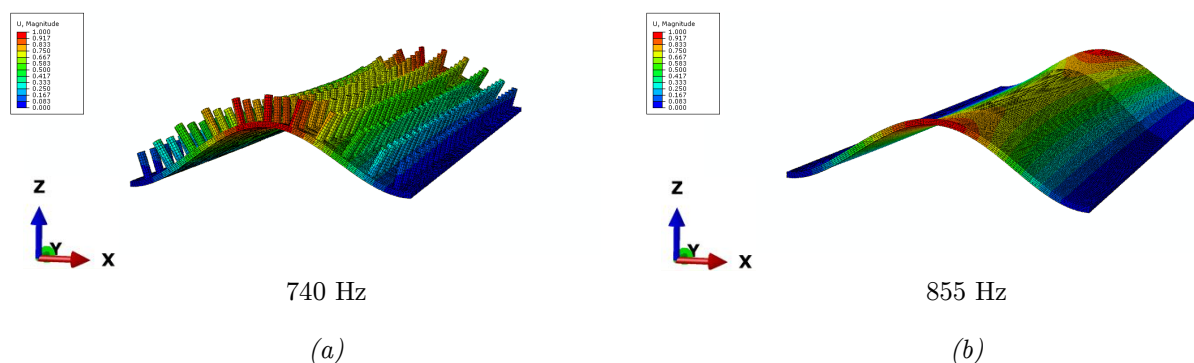


figure II-20 : Fréquence de vibration du 1^{er} mode d'une plaque (a) avec picots (b) sans picots

Un écart de 115 Hz est observé entre les deux modèles numériques représentant une erreur de l'ordre de 13%. Cet écart entre les deux fréquences de vibration peut être expliqué par le fait que les picots augmentent la masse globale sans pour autant apporter de raideur à la plaque. En effet, de par leur discontinuité et leur géométrie (section circulaire ici de diamètre 3 mm et de hauteur 10 mm), les picots n'apportent à la plaque que très localement de la raideur. Les résultats précédents montrent donc qu'il est impossible de négliger l'influence des picots sur la fréquence de vibration.

Considérer les ailettes ou les picots comme constitutifs d'une couche homogène implique d'attribuer à ces couches des propriétés homogénéisées. Les modèles analytiques sélectionnés dans le chapitre 1 permettent le calcul d'un coefficient d'échange convectif équivalent en fonction des paramètres géométriques du motif.

Dans le cas des analyses des phénomènes vibratoires et électriques, il est nécessaire de définir la conductivité électrique ainsi que des propriétés élastiques homogénéisées représentative des motifs picots et ailettes.

Dans un premier temps, des directions privilégiées des motifs « picots » et « ailettes » ont été identifiées :

- une direction privilégiée pour le motif « picot » : direction hors plan de la pièce (selon z) ;
- deux directions privilégiées pour le motif « ailette » : une direction hors plan de la pièce (selon z) et une direction dans le sens orientation des ailettes (selon y).

Dans un deuxième temps, des volumes représentatifs (VR) de chacune de ces deux couches ont été définis, soit un picot (figure II-21a) pour la couche homogène « picots » et une portion d'ailette (figure II-21b) pour la couche homogène « ailette ». Ces VR sont considérés bi-composants, constitués d'air et de matériaux.

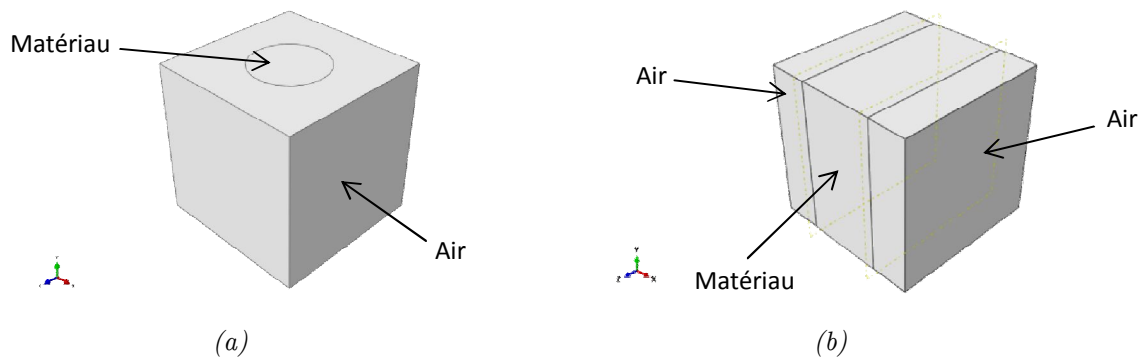


figure II-21 : VR (a) d'une couche « picots », (b) d'une couche « ailettes »

Les VR, de hauteur H , sont définis par différents paramètres géométriques comme représentés figure II-22.

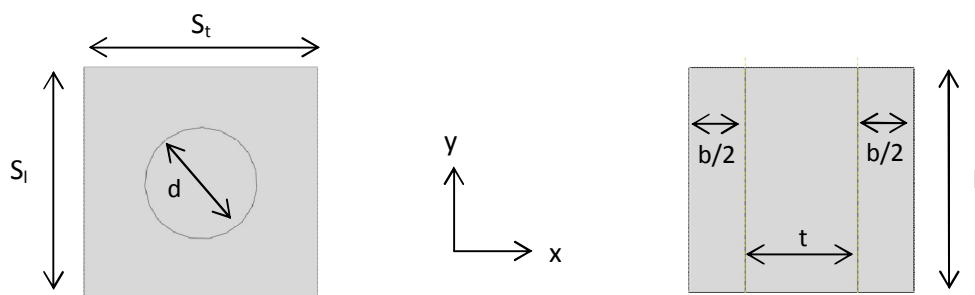


figure II-22 : Paramètres géométriques des VER « picot » et « ailette »

avec d : diamètre du picot (m)

S_l : Espacement des picots suivant la largeur de la plaque (m)

S_t : Espacement des picots suivant la longueur de la plaque (m)

l : Longueur de l'ailette (m)

t : Epaisseur de l'ailette (m)

b : Espacement entre deux ailettes (m)

Les propriétés homogénéisées de chacun des motifs géométriques ont été déterminées à l'aide des bornes de Voigt et Reuss (modèle série/parallèle) dans leurs directions privilégiées respectives. Des modélisations numériques des VR sur lesquels sont appliquées différentes conditions de sollicitations (traction, cisaillement) ont permis la validation des expressions analytiques évaluant le comportement mécanique de ces couches spécifiques en fonction des paramètres géométriques qui les définissent (figure II-23).

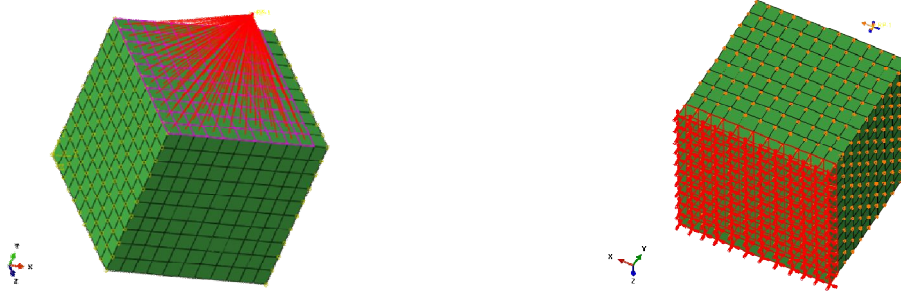


figure II-23 : Sollicitations appliquées sur un VR d'une couche homogénéisée

La figure ci-dessous compare la fréquence de vibration d'une plaque recouverte de picots (figure II-24a) à la fréquence de vibration d'une plaque recouverte d'une couche picots homogène (figure II-24b).

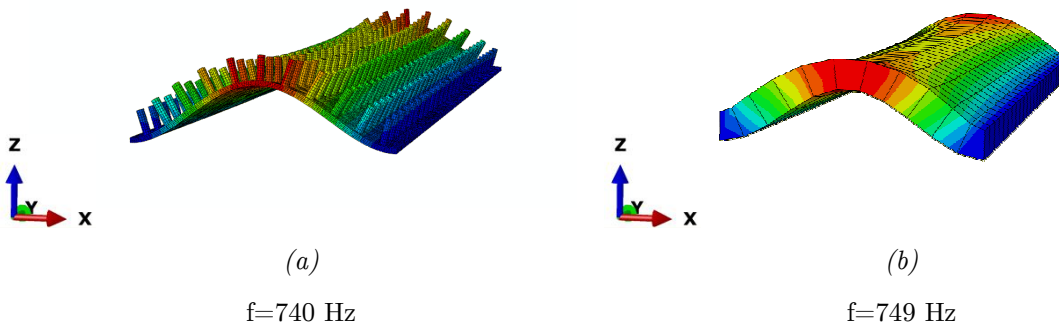


figure II-24 : Modélisation vibratoire d'une couche homogène picots, f =fréquence du premier mode propre

L'erreur engendrée par la modélisation des picots à l'aide d'une couche homogène sur la fréquence de vibration du premier mode est inférieure à 2%. La modélisation des picots par une couche homogène est donc également validée sur l'aspect vibratoire.

D'un point de vue électrique, l'apport local de matière engendré par les picots provoque une diminution locale de la résistance électrique. Cependant, du fait de leurs dimensions et de leur discontinuité, l'influence sur la résistance électrique recherchée peut être négligée.

II.3.2.2 Modélisation des bossages et des bords d'interface glissières

Le bossage constitue localement un apport de matière pouvant influencer sur la fréquence du 1^{er} mode de vibration du fait d'une modification de la raideur de la pièce. Pour étudier cette influence, deux géométries sont sollicitées dans les mêmes conditions

d'appuis, une avec bossage (figure II-25a) et une sans bossage (figure II-25b).

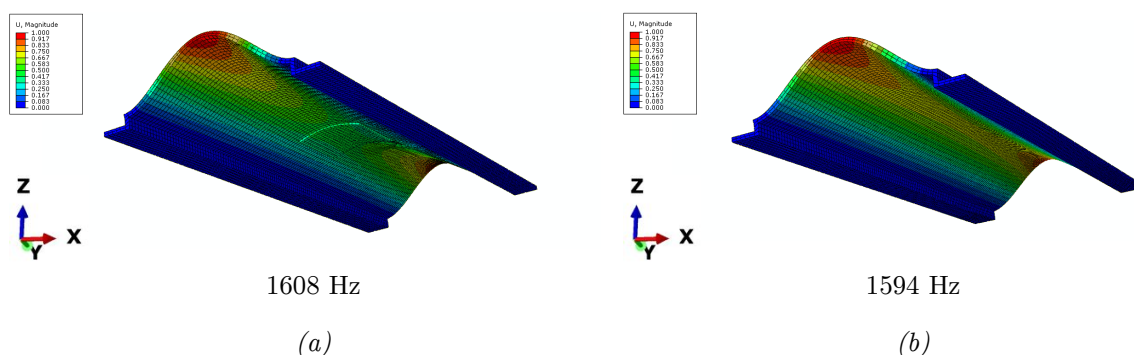


figure II-25 : Fréquence du 1^{er} mode de vibration du capot (a) avec bossage (b) sans bossage

Le bossage modélisé est celui du processeur 1, processeur situé approximativement au centre de la face interne du capot et qui présente les plus grandes dimensions ($33,3 \times 33,3 \times 1,1 \text{ mm}^3$). La présence de ce bossage entraîne une hausse de 14 Hz par rapport au modèle sans bossage. L'erreur engendrée par la suppression du bossage, inférieure à 1%, sera considérée comme acceptable dans la suite de ce travail.

Les bossages engendrent une diminution locale de la résistance électrique du capot supérieur liée à l'augmentation locale de l'épaisseur. Du fait des faibles dimensions des bossages par rapport aux dimensions du capot supérieur, ces augmentations locales de résistance électrique seront considérées comme négligeables.

La fréquence de vibration du 1^{er} mode va être impactée par l'aplatissement des bords d'interfaces glissières. Les surfaces d'application des conditions aux limites d'encastrement vont être sensiblement différentes entre le modèle constitué des bords d'interface glissières (figure II-26a) et le modèle sans (figure II-26b).

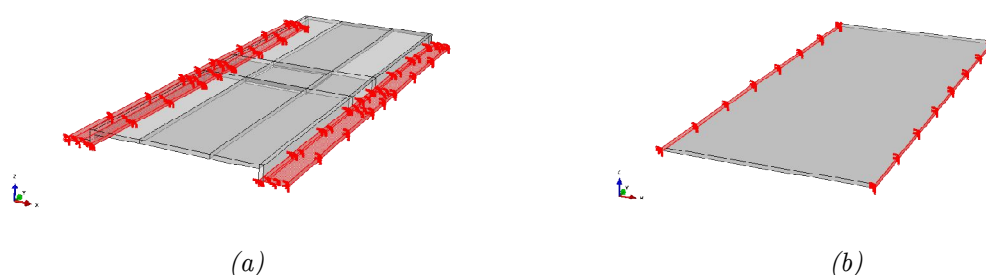


figure II-26 : Surface d'application des conditions aux limites d'encastrement (a) modèle avec les bords d'interface glissières (b) modèle sans les bords d'interface glissières

Il est dès lors peu cohérent de comparer les 1^{ers} modes de vibration de ces deux

plaques tant les surfaces d'applications des conditions aux limites sont différentes. C'est pour cela que le niveau d'exigence de l'astreinte vibratoire défini dans le cahier des charges a été adapté aux exigences requises d'une plaque plane.

La suppression des bords des interfaces glissières entraîne une augmentation de la largeur de la plaque. Cette augmentation entraîne une diminution de la résistance électrique calculée. Du fait de l'erreur engendrée par la prise en compte des glissières dans la dimension de la largeur de la plaque (inférieure à 9%), l'hypothèse de leur suppression est considérée acceptable.

II.3.3 Implémentation du modèle numérique

La partie précédente a permis de modéliser les phénomènes thermiques, vibratoires et électriques subis par le capot supérieur du boîtier à partir d'un modèle représentatif géométrique simplifié, à savoir une plaque rectangulaire multicouche d'épaisseur constante. Au-delà de la simplicité de sa géométrie, le compromis entre la complexité du modèle (et donc le temps de calcul) et l'erreur engendrée définit l'efficacité d'un modèle numérique (figure II-27).

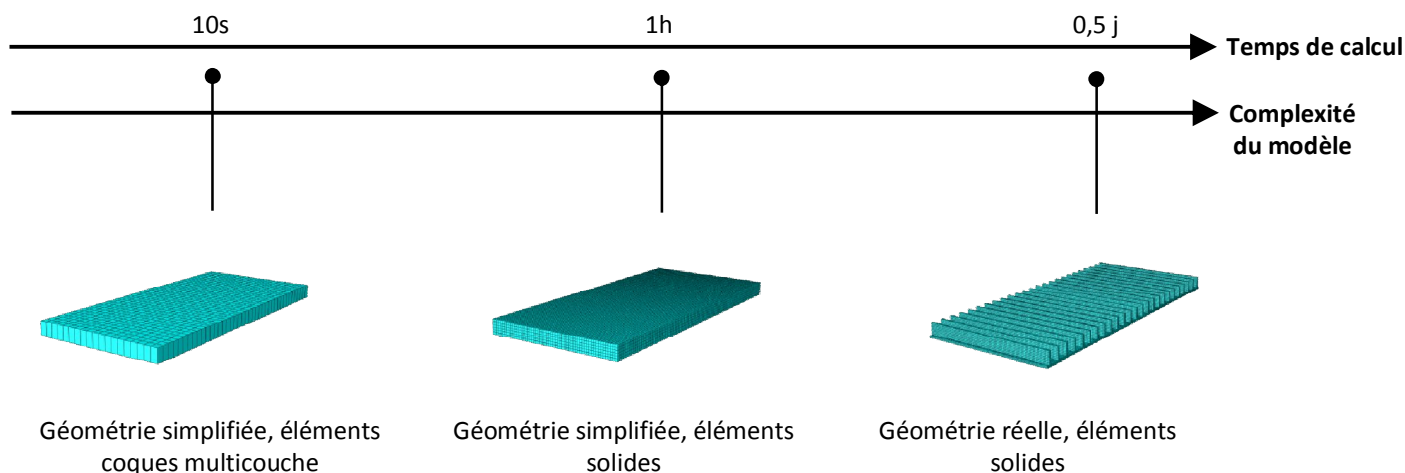


figure II-27 : Temps de calcul et complexité du modèle pour différents cas

L'étude sera menée dans la suite de ce travail sur une plaque plane multicouche. Cette plaque bicouche est constituée d'une couche inférieure de 2mm d'alliage métallique A associée à une couche picots homogène. Cette couche picots homogène possédera les propriétés physiques relatives à la configuration géométrique des picots présents sur le

capot supérieur et possèdera également les propriétés de l'alliage métallique A. La plaque multicouche de référence sera composée d'éléments solides quadratiques avec un maillage fortement affiné (éléments cubiques de côté 1mm) et aura les dimensions du capot supérieur fournies dans le cahier des charges.

Dans le but de réduire les temps de calcul liés à l'utilisation des modèles numériques, une attention a été portée sur le type d'éléments utilisés dans la modélisation ainsi que sur la richesse du maillage.

i. Type d'élément

Deux types d'éléments ont été envisagés : les éléments solides et les éléments coques 3D (aussi appelés coques volumiques).

Dans le cas de la modélisation des phénomènes thermiques, l'emploi d'éléments solides a engendré des temps de calculs raisonnables justifiant leur utilisation dans la suite de ce travail lors de la construction du modèle thermique.

Dans le cas de la modélisation vibratoire, les éléments coques volumiques, basés sur l'hypothèse d'un cisaillement transverse constant dans l'épaisseur de la coque multicouche, permettent de considérer des conditions aux limites d'encastrement sur les faces latérales de la plaque. Les éléments solides nécessitent quant à eux un nombre conséquent d'éléments dans l'épaisseur du multicouche pour permettre une modélisation juste du phénomène physique. Si la multiplication d'éléments solides dans l'épaisseur du multicouche entraîne une plus juste modélisation du phénomène vibratoire, elle engendre également des temps de calculs plus grands. Pour le compromis proposé entre écart sur la grandeur physique calculée et temps de calcul, les éléments coques volumiques seront utilisés dans la suite de ce travail dans la construction du modèle vibratoire.

Le tableau II-4 récapitule l'écart calculé entre la plaque multicouche de référence et la plaque multicouche construite à partir des éléments précédemment retenus. Cet écart est calculé sur les deux grandeurs physiques étudiées et les temps de calcul associés sont explicités.

| | Thermique (éléments solides) | | Vibratoire (éléments coques volumiques) | |
|--------------------|---------------------------------|-------------------|--|-------------------|
| | Ecart (%) | Tps de calcul (s) | Ecart (%) | Tps de calcul (s) |
| plaque multicouche | 0 | 108 | < 1 | 123 |

tableau II-4 : Erreurs engendrées et temps de calcul engendré par les éléments sélectionnés dans la construction des modèles numériques

ii. Maillage de la pièce

Le travail s'est ensuite porté sur l'étude de l'influence de la richesse du maillage utilisé lors de la modélisation sur la température calculée au centre de la face interne (figure II-28).

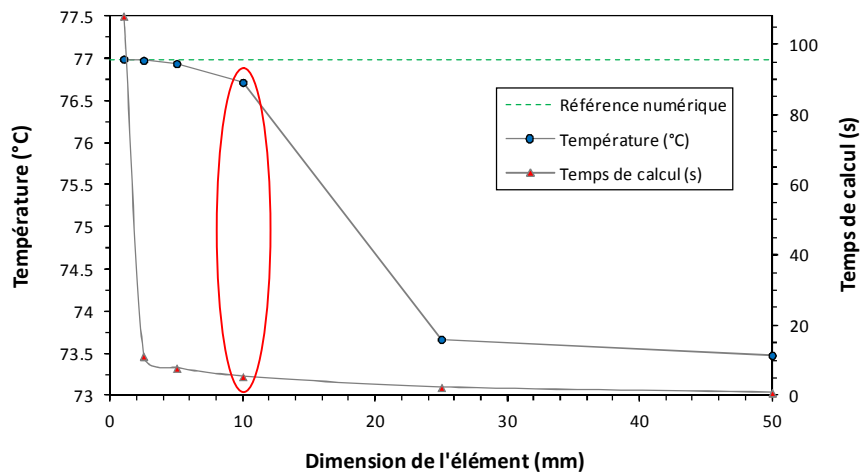


figure II-28 : Dépendance au maillage du modèle numérique thermique

L'influence observée de la taille de l'élément sur le modèle thermique permet de déterminer la taille de l'élément. Dans le plan de la plaque, des éléments solides de dimensions 10 mm (soit 1 élément par couche du multicouche) proposent un compromis très acceptable entre écart engendré sur la grandeur physique mesurée et temps de calcul associé (tableau II-5) en comparaison avec le modèle numérique de référence.

| Dimension de l'élément (mm) | Tps de calcul (s) | Ecart (%) |
|-----------------------------|-------------------|-----------|
| 1 (maillage de référence) | 108 | 0 |
| 2.5 | 11,2 | 0,018 |
| 5 | 7,8 | 0,067 |
| 10 | 5,4 | 0,358 |
| 25 | 2,3 | 4,51 |

tableau II-5 : Ecart et temps de calcul engendrés par les éléments 3D dans la construction des modèles thermiques, écart calculé par rapport à une modélisation utilisant les mêmes éléments de dimensions 1 mm

La même étude est ensuite réalisée afin de définir l'influence de la richesse du maillage sur le calcul de la fréquence de vibration du 1^{er} mode de la plaque (figure II-29).

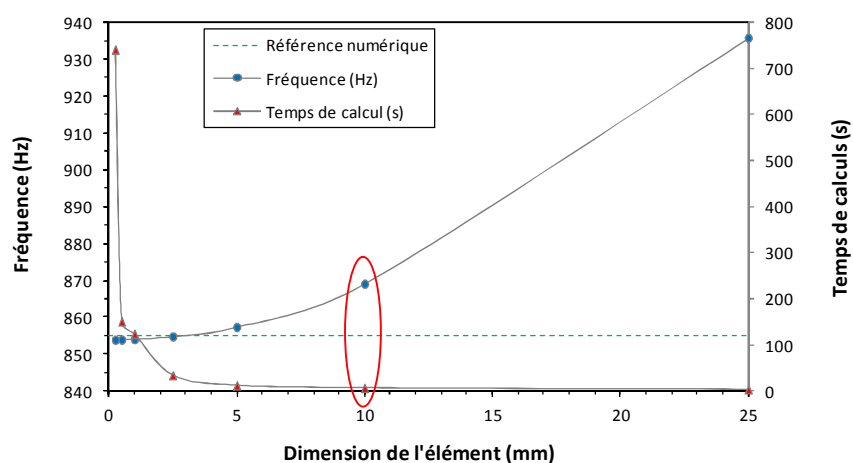


figure II-29 : Dépendance au maillage du modèle numérique vibratoire

L'influence observée de la taille de l'élément sur la fréquence de vibration du premier mode illustre que des éléments coques volumiques de dimensions 10 mm de côté proposent également un compromis très acceptable entre écart calculé sur la grandeur physique mesurée et temps de calcul (tableau II-6) également en comparaison avec le modèle numérique de référence.

| Dimension de l'élément (mm) | Tps de calcul (s) | Ecart (%) |
|--|-------------------|-----------|
| maillage de référence, volumique 3D | 123 | 0 |
| 2.5 | 33,3 | 0,021 |
| 5 | 11,5 | 0,28 |
| 10 | 6,1 | 1,62 |
| 25 | 2,8 | 8,64 |

tableau II-6 : Ecart et temps de calcul engendrés par les éléments sélectionnés dans la construction des modèles vibratoires

Quelle que soit la méthode choisie par la suite, les modèles éléments finis thermique et vibratoire seront utilisés simultanément des dizaines de milliers de fois au cours d'un même calcul d'optimisation. Il était important au cours de cette étude de dépendance de faire des choix permettant d'obtenir des temps de calcul les plus courts possibles et de même ordre de grandeur entre les deux modèles.

II.4 Conclusion

Un packaging de carte électronique embarquée est une pièce multifonctionnelle assurant des fonctions aussi bien thermiques, mécaniques ou encore électriques. Le besoin de proposer des solutions plus légères ainsi que l'augmentation des niveaux de puissance des composants électroniques justifient les travaux de recherche qui visent à proposer des solutions optimisées au regard de ces cahier des charges toujours plus exigeants. Cette situation est identifiée par Wargnier [WARGNIER, 2010] comme étant une des situations favorable au recours à une solution multimatériau : du fait d'un niveau d'exigence trop élevé, les matériaux monolithiques ne sont pas en mesure de proposer des solutions au concepteur.

Des hypothèses ont été établies et numériquement validées permettant de déterminer un modèle représentatif du comportement du capot supérieur. La définition et la validation de modèles analytiques évaluant les propriétés équivalentes de couches homogénéisées représentant des « ailettes » ou des « picots » a permis l'intégration de ces motifs géométriques dans la démarche de conception de multimatériaux multicouches.

La démarche de conception s'appuie ici sur le choix simultané d'un couple architecture/matériaux au sein d'un espace de solutions défini par l'association d'une base de données de motifs géométriques et d'une base de données de matériaux. Il est à présent nécessaire de définir un outil permettant la sélection simultanée ou l'optimisation d'un couple architecture/matériaux dans l'hyperchoix que constitue l'association des deux bases de données.

CHAPITRE III

LA SELECTION D'UN COUPLE ARCHITECTURE/MATERIAUX

L'espace de recherche de matériaux architecturés obtenu par l'association des bases de données mises en place impose le recours à un outil permettant la sélection simultanée des motifs géométriques élémentaires et des constituants du multimatériau. Une description des deux grandes familles d'algorithmes d'optimisation ainsi qu'une classification générale est proposée permettant la compréhension du choix de l'algorithme retenu. L'efficacité de l'algorithme sélectionné est conditionnée par les paramètres qui le définissent. Une démarche guidant une étude paramétrique de l'algorithme sera mise en place à l'issue de laquelle des paramètres permettant une qualité de résultat maîtrisée dans des temps de calculs acceptables seront définis. Ce travail nécessitera la définition d'un cas d'étude permettant une résolution complètement analytique des fonctions de contraintes. L'application de l'algorithme d'optimisation à ce dernier et au problème de conception sera enfin proposée.

III LA SELECTION D'UN COUPLE ARCHITECTURE/MATERIAUX

| | |
|---|-----|
| III.1 Le choix d'un outil de sélection | 93 |
| III.1.1 Les méthodes de résolution | 93 |
| III.1.2 Les algorithmes génétiques..... | 98 |
| III.1.3 Définition d'un cas d'étude préliminaire | 103 |
| III.2 Application au problème de conception du multimatériau..... | 107 |
| III.2.1 Codage des individus | 107 |
| III.2.2 Etude de dépendance des paramètres génétiques | 108 |
| III.3 La proposition de solutions | 116 |
| III.3.1 Résolution du cas d'étude préliminaire | 116 |
| III.3.2 Résolution du cas d'étude industriel | 124 |
| III.4 Conclusion | 128 |

III.1 Le choix d'un outil de sélection

Dans la méthodologie proposée dans ce travail, la résolution d'un problème d'optimisation dans le but d'identifier une solution optimisée parmi un ensemble de candidats potentiels nécessite de faire le choix simultané d'un couple architecture/matériaux. Il suffit en théorie de balayer la totalité des candidats afin de déterminer lesquels répondent à l'ensemble des contraintes du cahier des charges, c'est-à-dire les solutions au problème de conception posé, puis de classer ces solutions en fonction d'une performance évaluée pour chacune d'entre elles. Cependant, du fait du nombre de combinaisons engendrées par l'association des deux bases de données, l'énumération exhaustive des candidats devient impossible car elle conduirait à des temps de calculs excessifs. Une méthode spécifique a donc été développée pour répondre à cette problématique.

Les problèmes d'optimisation sont généralement divisés en deux domaines :

- les problèmes à variables continues. Le terme d'optimisation continue est utilisé si les variables définissent un ensemble continu de valeurs (tous les réels contenus entre deux limites par exemple) ;
- les problèmes à variables discrètes. On parle d'optimisation discrète si les variables appartiennent à un ensemble dénombrable (l'ensemble des entiers par exemple).

Dans la réalité, à l'image du travail présenté dans ce manuscrit, la plupart des problèmes d'optimisation sont mixtes, c'est-à-dire constitués de variables continues et de variables discrètes. Si la résolution de ces deux types d'optimisation a longtemps été traitée de manière distincte, les méthodes de résolution apparues et développées ces 30 dernières années ont permis de réconcilier ces deux branches de l'optimisation. A partir d'algorithmes fondés sur une ou plusieurs heuristiques ou métaheuristiques, ces méthodes permettent la résolution de problèmes d'optimisation mixtes dont le nombre de candidats, bien que fini, ne permet pas une résolution par énumération exhaustive.

III.1.1 Les méthodes de résolution

Aujourd'hui, il existe de très nombreuses méthodes de résolution. Il est cependant

possible de distinguer deux familles principales : les méthodes déterministes et les méthodes stochastiques. Une classification des algorithmes d'optimisation adoptée dans ce travail est proposée figure III-1. L'objectif de cette partie n'est pas d'effectuer une description exhaustive de l'ensemble des algorithmes d'optimisation. Pour une présentation plus approfondie, les travaux de Glover et al. [GLOVER, 2006] et de Dréo et al. [DREO, 2003] pourront apporter au lecteur des éléments de réponses en rapport aux différentes classes de métaheuristiques évoquées.

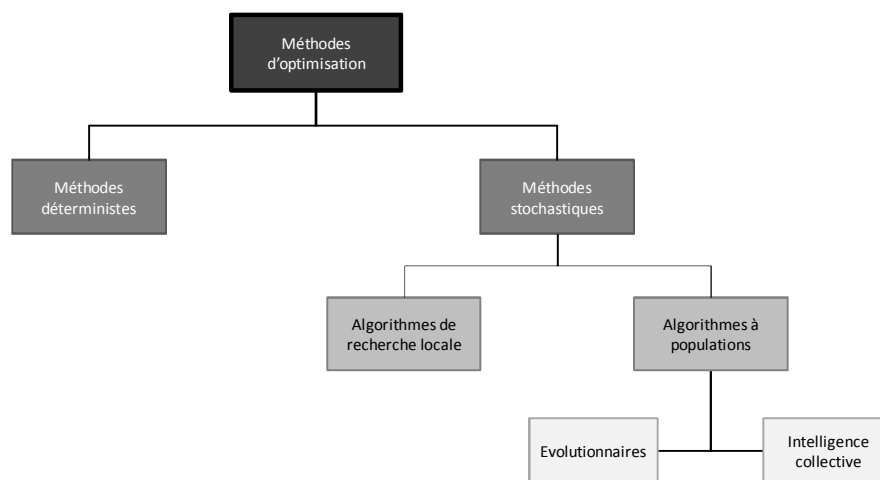


figure III-1 : Exemple de classification des algorithmes d'optimisation

III.1.1.1 Les méthodes déterministes

Aussi rencontrées sous le nom de méthodes exactes, cette classe de méthodes est composée de grandes familles d'algorithmes parmi lesquelles les algorithmes du gradient, les algorithmes de « branch and bound » ou encore les algorithmes de programmation par satisfaction de contraintes. Ces méthodes sont caractérisées par une exploration méthodique de recherche selon un processus défini. Elles sont limitées à des problèmes présentant une fonction objectif dérivable et convexe [COLLIGNAN, 2011] garantissant l'optimalité de la solution identifiée pour un espace de recherche de taille finie dans un temps limité [PUCHINGER, 2005]. Le temps nécessaire pour identifier la solution optimale pouvant augmenter exponentiellement avec la taille du domaine d'étude, les méthodes déterministes rencontrent ainsi des difficultés dans la résolution de problèmes de taille importante.

III.1.1.2 Les méthodes stochastiques

Parfois appelées méthodes approchées, les métaheuristiques qui les composent sont elles-mêmes divisées en deux familles [BLUM, 2003] :

- les algorithmes de recherche locale, aussi rencontrés sous le nom d'algorithmes de recherche par voisinage. Ces algorithmes, parmi lesquels la méthode tabou ou encore l'algorithme du recuit simulé sont les plus connus, font itérativement évoluer une configuration courante vers une configuration proche de la configuration courante [DREO, 2003] ;
- les algorithmes à population basés sur la manipulation itérative de population de candidats pour l'obtention d'une solution. Le travail de Collignan [COLLIGNAN, 2011] différencie les algorithmes évolutionnaires et les algorithmes à intelligence collective. Les premiers sont basés sur une modification itérative des individus d'une population comme les algorithmes génétiques par exemple tandis que les seconds sont basés sur un système de communication et de coopération entre les individus d'une population comme l'algorithme de colonies de fourmis par exemple.

Indépendamment de leur classification, les méthodes stochastiques présentent un squelette de fonctionnement commun basé sur une démarche itérative composée d'une phase d'évaluation et d'une phase d'opération. Ces méthodes font appel à des tirages aléatoires des points explorés dans l'espace de solutions. Particulièrement adaptées dans des problèmes possédant de vastes espaces de recherche, elles sont efficaces dans le cas de fonctions objectifs discontinues et non dérivables [COLLIGNAN, 2011] par opposition aux méthodes déterministes. Basées sur des procédures itératives et sur le mimétisme de mécanismes naturels [DREO, 2003], les méthodes stochastiques ne garantissent pas l'optimalité de la solution obtenue. Permettant de traiter des problèmes aux variables de conception aussi bien continues que discrètes, elles sont également efficaces dans la résolution de problèmes multimodaux [IRISARRI, 2009].

III.1.1.3 Le choix d'une méthode de résolution

La recherche d'un matériau architecturé, c'est à dire d'un couple

architecture/matériaux dans l'espace des matériaux architecturés construit à partir de la base de données des motifs géométriques élémentaires et de la base de données des matériaux impose le choix d'une méthode de résolution capable d'évoluer au sein d'un espace de recherche de très grande taille. La méthode de résolution choisie doit être capable de faire face à différents enjeux.

i. La maîtrise des temps de calculs

Dans le cas du problème traité dans ce manuscrit, l'hyperchoix proposé par la combinaison des deux bases de données conduit à un espace de recherche de très grande taille pouvant conduire à des temps de calculs associés inacceptables dans le cadre d'une méthode de résolution déterministe. Face à ce problème, les nombreuses méthodes de résolution basées sur des algorithmes stochastiques semblent pouvoir apporter une réponse adaptée.

ii. La mixité du problème traité et la gestion du piégeage dans les optimums locaux

Sélectionner simultanément une architecture et des matériaux en réponse au cahier des charges, c'est aussi résoudre un problème d'optimisation traitant des variables discrètes (motif géométrique élémentaire, matériaux...) et continues (fraction volumiques, paramètres géométriques du motif...) composant un espace de recherche multimodal, c'est-à-dire présentant plusieurs optimums locaux. L'incapacité des algorithmes itératifs « classiques » à pouvoir s'extraire d'un optimum local est la base de toutes les métaheuristiques stochastiques dites de recherche locale. En effet, ces métaheuristiques, à l'aide de mécanismes de contrôle de dégradations spécifiques à chacune d'entre elles, autorisent ponctuellement une dégradation temporaire de la fonction objectif entre deux itérations [DREO, 2003]. En effet, ces métaheuristiques intègrent des outils permettant, au cours de l'exécution de l'algorithme, de ponctuellement orienter la recherche dans une direction qui n'est pas forcément celle de l'optimisation, ce que ne peuvent pas faire les méthodes déterministes. Dans la résolution d'un problème multimodal, le but d'une telle démarche est de pouvoir s'extraire du piège que représente un optimum local. Le paramétrage de ces outils est capital car une utilisation non maîtrisée peut conduire à une trop grande diversification de la recherche, qui se traduirait par l'obtention d'une solution non optimisée. Les métaheuristiques dites à population disposent aussi de mécanismes

spécifiques permettant le non piégeage dans un optimum local de l'espace de recherche comme par exemple le phénomène de mutation appliquée aux individus d'une population d'un algorithme génétique. Les différentes métaheuristiques telles que le recuit simulé, la méthode tabou, les algorithmes génétiques ou encore les algorithmes à colonies de fourmis sont donc toutes a priori susceptibles d'être utilisées dans la résolution du problème d'optimisation développé dans ce manuscrit.

iii. L'obtention d'une solution optimale

Le travail de Blum et al. [BLUM, 2003] reprend les notions de diversification et d'intensification de la recherche de solutions introduites par Glover et al. [GLOVER, 2013] au sujet de l'algorithme de la recherche tabou. Une démarche basée sur la diversification permettra de parcourir un plus grand ensemble de l'espace de recherche au risque d'une moindre qualité de la solution proposée. Une approche basée sur l'intensification permettra une recherche plus approfondie dans un espace plus restreint au risque de rester piégé dans un optimum local du problème d'optimisation. Les auteurs y expliquent comment le compromis entre une démarche basée sur la diversification et une approche portée sur l'intensification définit l'efficacité d'une métaheuristique. Ce compromis entre diversification et intensification d'une approche peut être visualisé dans le cas d'un espace de recherche à une dimension (représenté par une variable x) avec une fonction objectif présentant plusieurs optimums locaux (figure III-2).

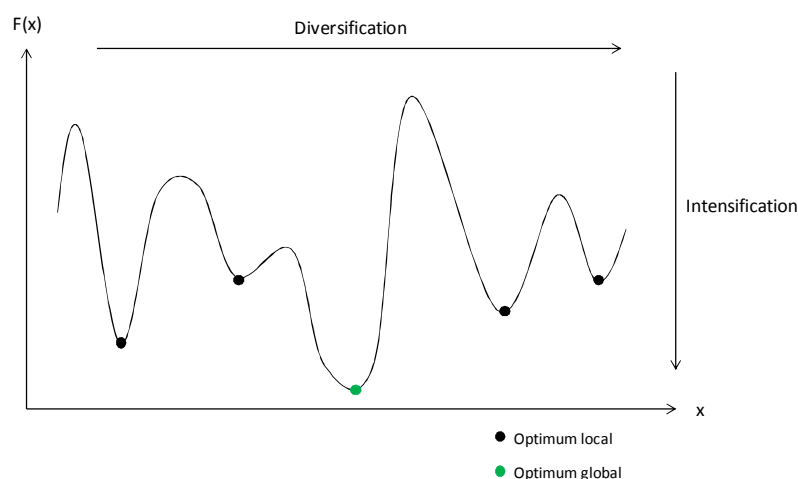


figure III-2 : Diversification versus intensification dans la recherche d'une solution au sein d'un espace de recherche présentant de nombreux optimums locaux

Les méthodes stochastiques constituent donc une réponse appropriée au problème traité dans ce manuscrit. Différents auteurs ont proposé une comparaison de ces métaheuristiques, les travaux de Hao et al. [HAO, 1999], d'Autin [AUTIN, 2006] et de Wolpert et al. [WOLPERT, 1997] ont montré qu'il n'existe pas de classement universel des différentes métaheuristiques. Il est alors nécessaire de réaliser ce choix en réponse aux spécificités du problème d'optimisation considéré.

Par ailleurs, dans ce travail, le choix de la métaheuristique est appuyé par les résultats proposés par des travaux de la littérature traitant de la résolution de problème d'optimisation, notamment en matière de résolution de problème de conception de multimatériaux. Dans ce cadre, les algorithmes génétiques semblent être particulièrement adaptables. Ainsi, les algorithmes génétiques ont été utilisés dans des buts variés, par exemple pour le choix des matériaux de peaux et d'âme d'un sandwich [LEITE, 2014], pour le choix des constituants et du type de renfort (particulaire ou fibreux) d'un composite [DURATTI, 2002], ou bien encore pour l'optimisation de la stratification d'un composite fibreux [MONTEMURRO, 2012].

III.1.2 Les algorithmes génétiques (AG)

Le premier modèle formel d'algorithme génétique est proposé en 1975 par John Holland [HOLLAND, 1992]. L'auteur y explique comment ajouter des mécanismes basés sur l'intelligence tels que les croisements (échange de matériel génétique) ou la mutation (source de la diversité génétique) dans un programme informatique.

III.1.2.1 Principe de fonctionnement

Le principe d'un algorithme génétique est de créer une population initiale afin de la faire évoluer en imitant les mécanismes de la sélection naturelle, ayant tendance à permettre aux individus les plus adaptés de perdurer, et faisant disparaître les autres. Chaque candidat est vu comme un individu, les variables de conception constituant les gènes de cet individu. Chaque individu est représenté par un ensemble de chromosomes tandis qu'une population constitue un ensemble d'individus. Chaque chromosome est défini par un ensemble de gènes (figure III-3).

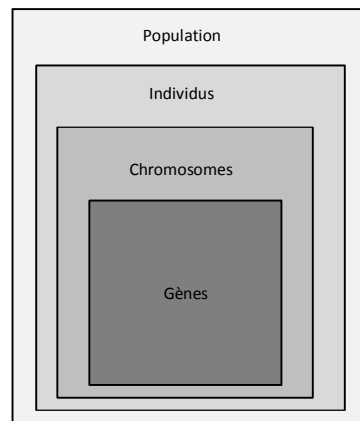


figure III-3 : Niveaux d'organisation d'un algorithme génétique.

Un algorithme génétique classique suit le déroulement suivant (figure III-4) :

- a) création de la population initiale P_0 : le point de départ est une population initiale composée d'individus générés aléatoirement ;
- b) évaluation de chaque individu de la population en calculant la fonction objectif;
- c) opérations de reproduction (croisement, mutation) pour créer la population de la génération suivante, on note P_t la population à l'itération t :
 - ⇒ sélection des couples de parents dans une population P_t fonction des valeurs des objectifs ;
 - ⇒ application de l'opérateur de croisement sur P_t selon une probabilité de croisement p_c ;
 - ⇒ application de l'opérateur de mutation sur P_t selon une probabilité de mutation p_m ;
 - ⇒ remplacement des parents dans P_t par les enfants pour créer la population P_{t+1} ;

Les opérations (b) et (c) sont ensuite répétées jusqu'à ce que le critère d'arrêt soit satisfait.

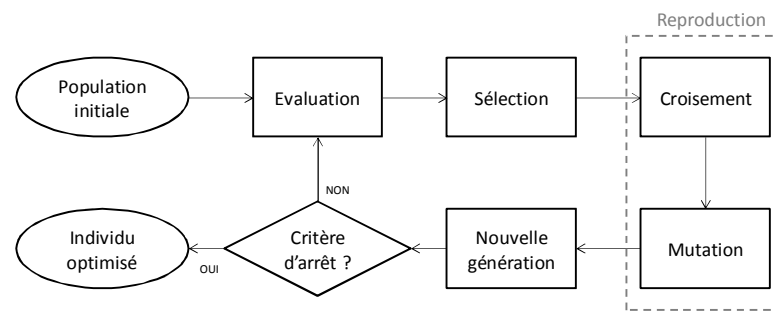


figure III-4 : Schéma de fonctionnement d'un algorithme génétique

Il est à noter que le critère d'arrêt de l'algorithme peut être de natures diverses :

- un nombre maximal de générations pendant lequel l'algorithme répète les opérations de reproduction et d'évaluation ;
- un nombre fixé de générations pendant lequel le meilleur individu identifié n'évolue plus ;
- une valeur seuil de la fonction objectif atteinte.

III.1.2.2 Les opérateurs génétiques

Un algorithme génétique présente trois opérateurs génétiques standards destinés à la sélection, le croisement et la mutation. Leur mode de fonctionnement doit être précisé car leur paramétrage influe sur le caractère intensif ou diversifié de la recherche de solution. Nous présenterons également les stratégies dites élitistes que nous adopterons dans cette étude. L'algorithme génétique utilisé dans ce travail, BIANCA [VINCENTI, 2009], propose un opérateur supplémentaire « isolation time » qui sera détaillé dans la suite de l'étude.

i. Opérateur de sélection

Cet opérateur est chargé de définir quels seront les individus qui vont être sélectionnés dans la nouvelle population afin de servir de parents. Cet opérateur est déterminant puisqu'il permet aux individus d'une population de survivre, de se reproduire ou de mourir. Dans une population P constituée de n individus, l'opérateur sélectionne $n/2$ individus. La probabilité de survie d'un individu est directement liée à sa performance.

Il existe essentiellement trois types de méthodes de sélection différentes :

- La sélection « *roulette wheel* » (traduire littéralement « la roulette biaisée ») ;
- La sélection par tournois ;
- La sélection universelle stochastique.

L'objectif n'est pas ici de détailler l'ensemble des méthodes de sélection mais de rentrer dans le détail de la méthode qui sera utilisée dans la suite de ce travail, à savoir la « *roulette wheel* », méthode la plus utilisée. Avec cette méthode, chaque individu a une chance d'être sélectionné qui est proportionnelle à sa performance. Chaque individu se voit ainsi attribué un secteur dont l'angle est proportionnel à son adaptation (figure III-5). Plus les individus sont adaptés au problème de conception, plus ils ont de chances d'être sélectionnés.

| Individu i | Qualité F_i |
|--------------|------------------------|
| 1 | 6 (performance élevée) |
| 2 | 3 |
| 3 | 2 |
| 4 | 1 (performance faible) |

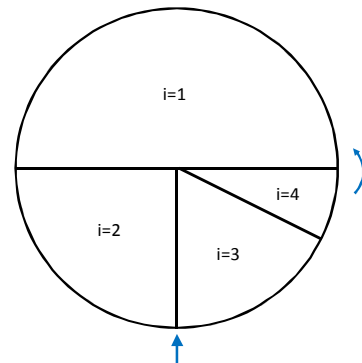


figure III-5 : La méthode de sélection « *roulette wheel* »

ii. Opérateur de croisement

Une opération de croisement est une transposition informatique du mécanisme qui permet, dans la nature, la production de chromosomes héritant de manière partielle des caractéristiques des parents. Le croisement vise à permettre la recombinaison des informations présentes dans le patrimoine génétique de la population (figure III-6). Après une sélection d'individus par l'opérateur de sélection, l'opérateur de croisement va créer des couples aléatoirement et les faire se reproduire. Les chromosomes des parents sont alors copiés et recombinaison de façon à former deux descendants possédant des caractéristiques issues des deux parents.

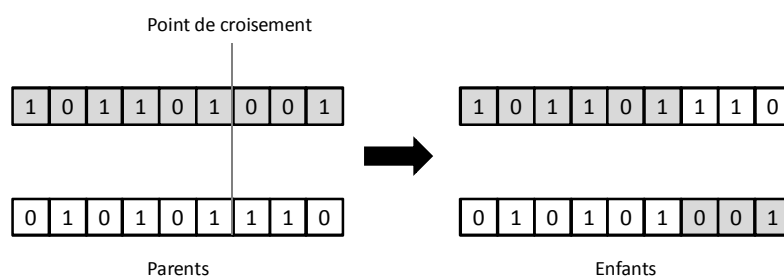


figure III-6 : L'opération de croisement

Le point de croisement définit la proportion de patrimoine génétique de chaque parent qui va constituer le patrimoine des enfants. L'algorithme utilisé propose un point de croisement défini aléatoirement à chaque opération.

L'opérateur de croisement agit selon une probabilité de croisement notée P_c . Des valeurs de P_c supérieures à 0,5 sont généralement utilisées dans la littérature [TEGHEM, 2012].

iii. Opérateur de mutation

La mutation consiste à altérer un gène dans un chromosome selon un facteur de mutation. Ce facteur est la probabilité qu'une mutation soit effectuée sur un individu. Ce mécanisme de mutation permet d'introduire et de maintenir la diversité des individus au sein de la population (figure III-7).

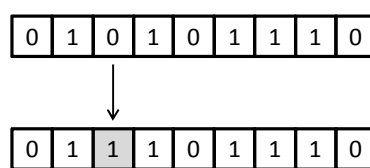


figure III-7 : L'opération de mutation

La probabilité de mutation P_m régit les opérations de mutation sur les individus d'une population. Cette probabilité P_m est généralement choisie très faible [MONTEMURRO, 2012].

iv. Elitisme

Une stratégie élitiste permet de préserver le meilleur individu d'une génération afin d'éviter sa perte éventuelle au cours d'opérations génétiques telles que le croisement et la

mutation. Cette procédure, très répandue, est communément appelée « élitisme ». Cette stratégie est adoptée dans la suite de ce travail, à noter que si elle présente l'avantage de garantir la survie des gènes de l'individu le plus fort, elle favorise l'exploration locale au détriment de la recherche globale pouvant induire la convergence de l'algorithme vers un optimum local.

v. Opérateur d'isolation time

Dans le cas où plusieurs populations sont utilisées dans la résolution du problème de conception, l'« isolation » time I_{time} définit le nombre de générations pendant lesquelles les populations sont isolées les unes des autres. Toutes les I_{time} générations, un échange du meilleur individu entre les populations est effectué. L'« isolation time » permet ainsi aux populations d'échanger entre elles, se guidant mutuellement vers des zones de recherches toujours optimisées, tout en assurant des explorations locales de leurs zones de recherche respectives.

III.1.2.3 Paramètres génétiques

Il existe 3 paramètres génétiques à partir desquels l'algorithme génétique va effectuer sa convergence :

- N_{pop} : nombre de populations ;
- N_{ind} : Nombre d'individus composant la population, individus aléatoirement créés lors de la génération initiale.
- $N_{géné}$: nombre de générations pendant lequel les individus d'une population vont évoluer ;

Le réglage de l'algorithme génétique (critère d'arrêt, nombre et taille des populations, probabilité de croisement, ...) représente un exercice délicat qui conditionne l'efficacité de sa convergence [IRISARRI, 2009]. Les interactions entre les différents paramètres et l'influence des opérateurs génétiques sur l'évolution de l'algorithme seront étudiées dans le paragraphe suivant dans le cadre d'un cas d'étude préliminaire défini spécifiquement pour cette étude.

III.1.3 Définition d'un cas d'étude préliminaire

Les requêtes définies dans le cahier des charges de l'application industrielle ne

permettent pas nécessairement leur résolution analytique du fait de la complexité des phénomènes physiques mis en jeu. Un cas d'étude préliminaire est défini afin de permettre une résolution totalement analytique des fonctions de contraintes et de la fonction objectif. Ce nouveau cahier de charges, présentant des contraintes de mêmes natures (thermique, mécanique et électrique) que celles définies dans le cadre du capot supérieur, doit permettre la validation de l'approche et des outils développés dans la méthodologie.

| | |
|---|--------|
| Largeur (en x) | 113 mm |
| Longueur (en y) | 247 mm |
| Epaisseur (en z) (hors bossages et picots) | 2 mm |

tableau III-1 : Dimensions caractéristiques du capot supérieur

Les dimensions de la plaque considérée dans le cas d'étude préliminaire sont explicitées dans le tableau II-1.

III.1.3.1 Objectif de conception

L'objectif de conception défini dans ce cas d'étude est la minimisation de la masse d'une plaque plane rectangulaire bicouche. La masse de cette plaque est définie par :

$$m = L.l \sum_{i=1}^2 e_i \cdot \rho_{eq_i} \quad (\text{III-1})$$

avec m : Masse de la plaque (kg)

L : Longueur de la plaque (m)

l : Largeur de la plaque (m)

e_i : Epaisseur de la couche i (m)

ρ_{eq_i} : Masse volumique équivalente de la couche i (kg/m^3)

III.1.3.2 Astreinte thermique

Une densité de flux de chaleur uniforme ($859 \text{ W}/\text{m}^2$) est appliquée sur la totalité de la face inférieure. Le contour de la plaque est considéré comme thermiquement isolé. Le problème se résume à un transfert thermique stationnaire conductif unidirectionnel à travers l'épaisseur et une dissipation thermique par convection sur la face supérieure de la plaque (figure III-8). Le coefficient de convection est calculé à partir du motif de la couche

supérieure de la plaque. La température sur la face inférieure est elle donnée par :

$$T_{FI} = \varphi \left(\sum_{i=1}^2 \frac{e_i}{\lambda_i} \right) + \frac{\varphi}{h_{conv}} + T_{ext} \quad (III-2)$$

avec T_{FI} : Température de la face inférieure de la plaque (K)

φ : Densité surfacique de flux (W/m^2)

λ_i : Conductivité thermique du matériau de la couche i ($W/m.K$)

e_i : Epaisseur de la couche i (m)

h_{conv} : Coefficient de convection sur la face supérieure ($W/m^2.K$)

T_{ext} : Température extérieure (K)

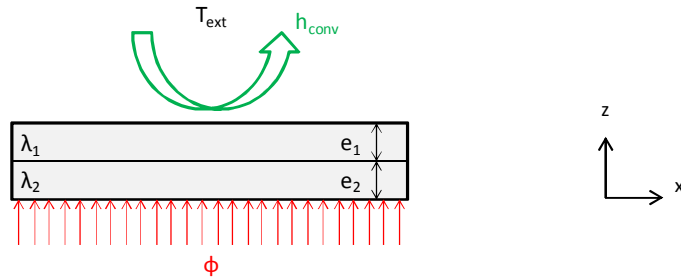


figure III-8 : Modélisation 1D des transferts thermiques

L'astreinte du cahier des charges impose que cette température T_{FI} reste inférieure à une valeur maximale admissible de $90^{\circ}C$.

III.1.3.3 Astreinte mécanique

Un critère mécanique basé sur la raideur de la plaque en traction dans la largeur (direction x) de la plaque (figure III-9) est proposé à partir de la relation :

$$C_m = \sum_{i=1}^2 E_{x_i} \cdot e_i \quad (III-3)$$

avec C_m : Critère mécanique (N/m)

E_{x_i} : Module d'Young du matériau de la couche i dans la direction x (Pa)

e_i : Epaisseur de la couche i (m)

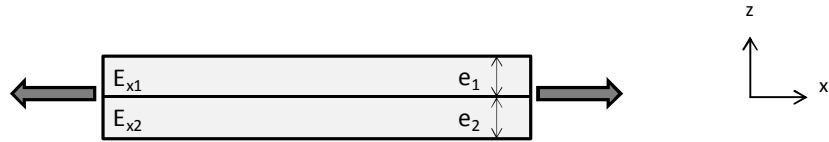


figure III-9 : Modélisation du critère mécanique défini

Une astreinte consistant à donner une raideur en traction minimale fixée à la plaque se traduit par une valeur de C_m supérieure à 13,85 N/m.

III.1.3.4 Astreinte électrique

L'astreinte électrique correspond à la résistance électrique rencontrée lors du parcours d'un courant d'une extrémité de la plaque à l'autre dans le sens de la longueur devant être inférieure à 2 mΩ (figure III-10). Elle est déterminée à partir de l'expression :

$$\frac{1}{R} = \frac{\ell}{L} \sum_{i=1}^2 \frac{e_i}{r_{e_i}} \quad (\text{III-4})$$

avec R : Résistance électrique de la plaque (Ω)

L : Longueur de la plaque (m)

ℓ : Largeur de la plaque (m)

r_{e_i} : Résistivité électrique équivalente dans la direction x de la couche i (Ω.m)

e_i : Epaisseur de la couche i (m)

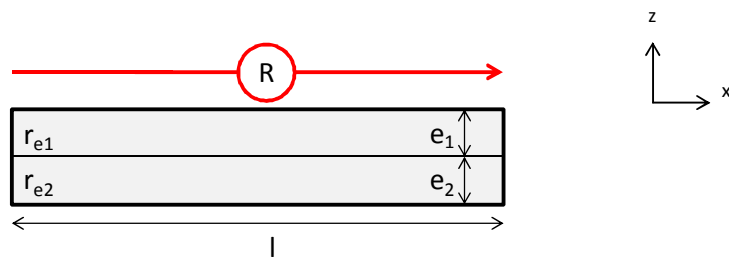


figure III-10 : Modélisation de la résistance électrique

Une synthèse des sollicitations et conditions aux limites imposées dans la définition des astreintes thermique, mécanique et électrique du cas d'étude préliminaire est proposée dans le tableau III-2 en comparaison de celles définies dans l'application industrielle.

| | Cas industriel | Cas préliminaire |
|------------|---|---|
| Thermique | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Transferts thermiques 3D ▪ Flux localisé principal (10 000 W/m²) sur 10 cm² au centre de la face inférieure ▪ Flux auxiliaires uniformisés (200 W/m²) sur le reste de la face inférieure ▪ Convection forcée face extérieure ▪ Résistance électrique glissière basse ▪ Résistance électrique glissière haute ▪ Rayonnement négligé | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Transferts thermiques 1D ▪ Flux uniforme (859 W/m²) sur la totalité de la face inférieure ▪ Convection forcée face supérieure ▪ Contour de la plaque isolé ▪ Rayonnement négligé |
| Mécanique | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Fréquence de vibration du 1^{er} mode ▪ Faces latérales de la plaque encastées | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Raideur en traction dans la direction x de la plaque |
| Electrique | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Résistance électrique entre les extrémités de la plaque suivant la longueur | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Résistance électrique entre les extrémités de la plaque suivant la longueur |

tableau III-2 : tableau récapitulatif des sollicitations et conditions aux limites pour les astreintes définies dans le cas industriel et 1D

III.2 Application au problème de conception du multimatériau

Si le principe de fonctionnement d'un algorithme génétique reste identique quel que soit le problème d'optimisation traité, la définition des individus et de leur génotype conditionne également la capacité de l'algorithme génétique à proposer une solution optimisée.

III.2.1 Codage des individus

L'individu est caractérisé par le nombre de chromosomes qui le composent, chromosomes eux-mêmes composés de gènes. Les individus sont les éléments constitutifs d'une population (figure III-11).

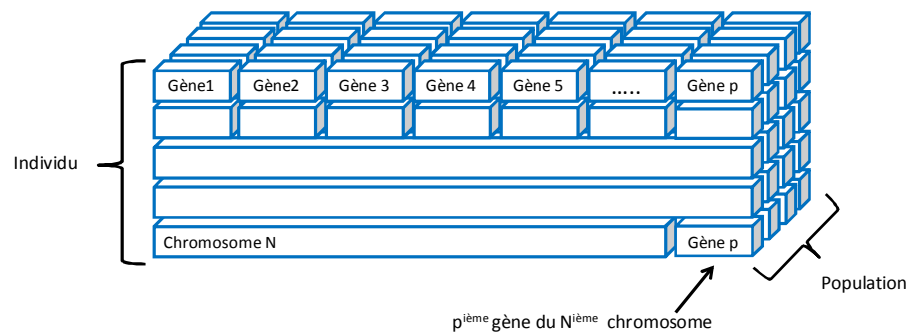


figure III-11 : Structuration d'une population de l'algorithme génétique [VINCENTI, 2009]

Le travail développé dans ce manuscrit s'est porté sur l'optimisation d'un multimatériau bicouche plan. Selon le formalisme adopté, un multimatériau bicouche est composé de deux chromosomes (correspondant au nombre de couche). A chaque chromosome sont associés des gènes, chaque gène représentant une variable de conception du problème, c'est-à-dire un paramètre physique ou géométrique définissant le multimatériau. Ces paramètres pouvant être discrets ou continus définissent les motifs géométriques élémentaires et les matériaux constitutifs.

La construction du génotype de chaque individu ainsi que les variables de conception associées sont présentées en annexe IV.

III.2.2 Etude de dépendance des paramètres génétiques

De nombreuses études se basent sur des d'approches empiriques pour la détermination des paramètres et opérateurs génétiques [DIETZ, 2004 ; IRISARRI, 2009]. Des travaux ont toutefois proposé des méthodes pour la détermination de jeux de paramètres et opérateurs génétiques optimisés. Basées sur l'optimisation de stratifiés dans l'amélioration de la tenue au flambage du multimatériau, les études de Le Riche et al. [LE RICHE, 1993, 1995] proposent des paramètres et opérateurs génétiques optimisés dont le choix a été basé sur un critère représentant un compromis entre le nombre d'évaluations de la fonction objectif réalisées durant un calcul (produit du nombre de populations, de la taille de la population et du nombre de générations) et la qualité de la solution obtenue. L'application de cette démarche est conditionnée par la connaissance préalable de l'optimum global du problème traité.

Du fait du nombre important de paramètres qui conditionnent l'efficacité de l'algorithme et de la singularité de chaque problème d'optimisation, une étude de dépendance des paramètres génétiques de l'algorithme utilisé pour la résolution du problème de conception est ici proposée. A travers l'observation de la convergence de l'algorithme génétique et de la qualité des solutions proposées, l'objectif de cette étude de dépendance est de définir des paramètres et opérateurs génétiques garantissant la proposition de solutions optimisées tout en assurant un nombre minimal de calculs. Du fait du nombre de calculs nécessaires à sa réalisation, cette étude paramétrique est appliquée à la résolution du cas préliminaire décrit précédemment.

III.2.2.1 Démarche utilisée dans l'étude paramétrique

Dans un premier temps, l'influence des paramètres agissant sur la génération des nouveaux individus d'une population est étudiée (figure III-12) :

- $N_{\text{gén}}$: nombre de générations pendant lesquelles les individus d'une population vont évoluer ;
- N_{ind} : nombre d'individus composant la population ;
- p_c : probabilité de croisement du génotype d'un couple de parents aléatoirement formé pour la création de deux nouveaux individus ;
- p_m : probabilité d'une altération stochastique du génotype d'un individu.

La démarche mise en place dans cette étude paramétrique impose l'utilisation d'un jeu de paramètres génétiques de départ. La taille de population de départ fixée à $N_{\text{ind}}=50$ est une valeur classiquement utilisée dans la littérature. Les valeurs par défaut des opérateurs génétiques $(p_c, p_m) = (0,85, 1/N_{\text{ind}})$ sont les valeurs préconisées dans le travail de Montemurro [MONTEMURRO, 2012]. L'auteur développe, dans son travail portant sur l'optimisation de composites stratifiés, l'algorithme génétique utilisé dans la suite de ce manuscrit. Ces valeurs sont reportées dans le tableau III-3.

| Paramètres | N_{ind} | p_c | p_m |
|------------|------------------|-------|---------------------|
| Valeurs | 50 | 0,85 | 1/ N_{ind} |

tableau III-3 : Valeurs par défaut des paramètres des opérateurs génétiques

La figure III-12 montre la démarche séquencée de détermination des paramètres

génétiques. Les paramètres donnés dans le tableau III-3 sont tout d'abord utilisés pour permettre la détermination du nombre de générations en autorisant une variation du nombre de générations de 25 à 200. Une fois le nombre de générations fixé, le nombre d'individus par population est étudié. L'intervalle d'étude est compris entre 50 et 140 individus. Le nombre de générations et le nombre d'individus sont alors fixés pour déterminer la probabilité de croisement qui est ensuite fixée pour déterminer la probabilité de mutation. Une fois les paramètres agissant sur les individus d'une population un à un fixés, l'influence du paramètre d'isolation time I_{time} agissant sur les échanges entre deux populations est étudiée. Le choix a été de faire varier les opérateurs par ordre d'exécution dans le processus génétique.

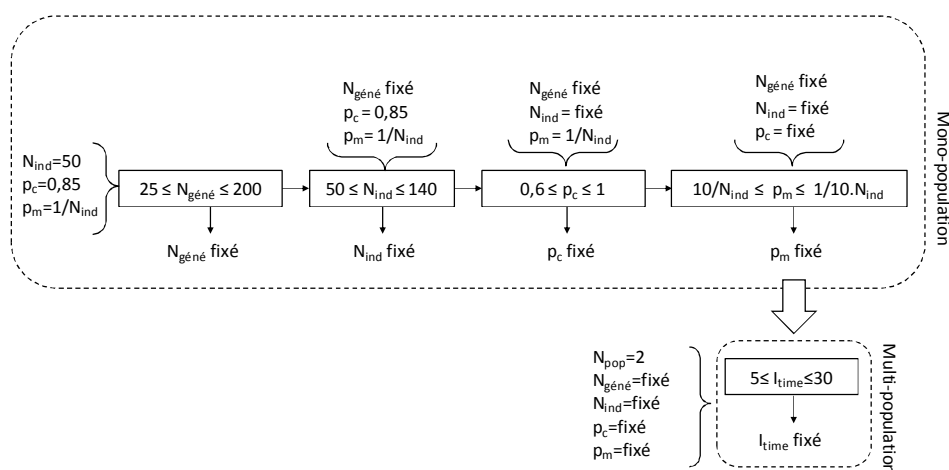


figure III-12 : Démarche utilisée dans l'étude de dépendance des paramètres génétiques

Il est à présent nécessaire de définir un critère permettant le choix d'un paramètre à chaque étape de cette étude. Pour rappel, l'objectif est ici de définir un jeu de paramètres, qui appliqué, au cas d'étude préliminaire, pourra être utilisé dans la résolution du problème de conception de l'application industrielle. Ce jeu de paramètres doit assurer une qualité maîtrisée de la solution proposée tout en permettant un nombre de calculs minimal. Ainsi, le critère de choix utilisé sera défini comme un coût relatif de calcul :

$$C_r = \frac{N_{éval}}{P_{acc}} \quad (\text{III-5})$$

où $N_{éval}$ représente le nombre d'évaluations de la fonction objectif ($N_{pop} \times N_{géné} \times N_{ind}$). P_{acc} est la probabilité calculée à partir de 50 répétitions d'obtenir une solution située

dans une zone d'optimisation définie comme acceptable. Dans les travaux de Le Riche et al. [LE RICHE, 1993, 1995], cette zone d'optimisation est définie à partir de l'optimum global du problème traité. Comme il est impossible de connaître l'optimum global du problème d'optimisation traité ici, cette zone sera définie pour permettre une diminution de 40% d'une masse de référence fixée à 155g. Toute solution sera alors considérée comme acceptable si elle possède une masse inférieure ou égale à 93g.

III.2.2.2 Paramètres étudiés

Les paramètres ainsi que les valeurs étudiées pour chacun sont récapitulés dans le tableau III-4. Les intervalles de variation de chaque paramètre ont été déterminés de manière à couvrir les valeurs rencontrées classiquement dans la littérature.

| Paramètres | valeurs |
|----------------------------------|---|
| Nombre de population N_{pop} | 1 ; 2 |
| Nombre de générations $N_{géné}$ | 25 ; 50 ; 100 ; 150 ; 200 |
| Nombre d'individus N_{ind} | 50 ; 80 ; 110 ; 140 |
| Probabilité de croisement p_c | 0,6 ; 0,65 ; 0,70 ; 0,75 ; 0,80 ; 0,85 ; 0,90 ; 0,95 ; 1 |
| Probabilité de mutation p_m | $\frac{10}{N_{ind}} ; \frac{5}{N_{ind}} ; \frac{2,5}{N_{ind}} ; \frac{1}{N_{ind}} ; \frac{1}{2,5.N_{ind}} ; \frac{1}{5.N_{ind}} ; \frac{1}{10.N_{ind}}$ |
| Isolation time It_{ime} | 5 ; 15 ; 25 ; 35 |

tableau III-4 : Paramètres étudiés et intervalles associés de l'étude de dépendance

III.2.2.3 Analyse des résultats

Le premier paramètre évalué est le nombre de générations pendant lesquelles la population d'individus va évoluer (figure III-13).

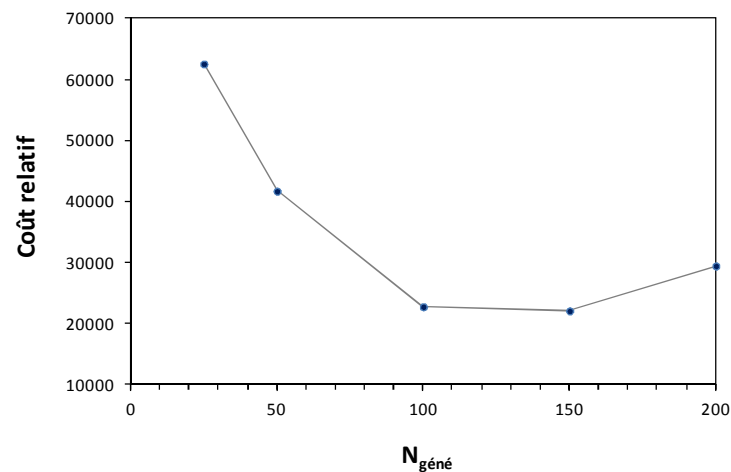


figure III-13 : Influence du nombre de générations

La figure précédente illustre que le coût relatif le plus faible est obtenu lorsque la population évolue pendant 150 générations. Une fois le nombre de génération fixé, la taille de la population est étudiée (figure III-14). D'une manière générale, une population importante permet d'obtenir une grande diversité, mais génère un coût relatif élevé du fait du nombre de calculs nécessaires. D'un autre côté, une taille de population trop faible sans grande diversité entraîne le risque d'une exploration bien plus partielle de l'espace de recherche.

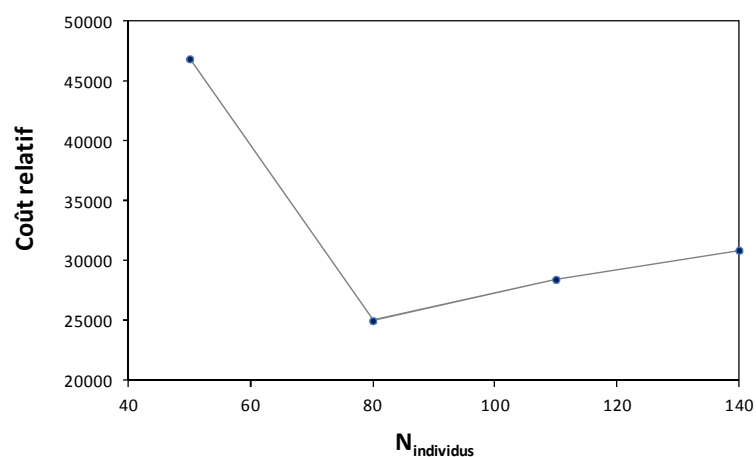


figure III-14 : Influence de la taille de la population

La figure précédente montre un coût relatif minimal lorsque la population est composée de 80 individus. L'algorithme fait à présent évoluer une population composée de 80 individus pendant 150 générations. La suite de l'étude paramétrique vise à montrer

l'influence de la probabilité de croisement (figure III-15). Le croisement enrichit la diversité de la population en recombinaison la structure des chromosomes des individus qui composent la population. Le coût est ici minimal lorsqu'une valeur de 0,85 est affectée à la probabilité de croisement.

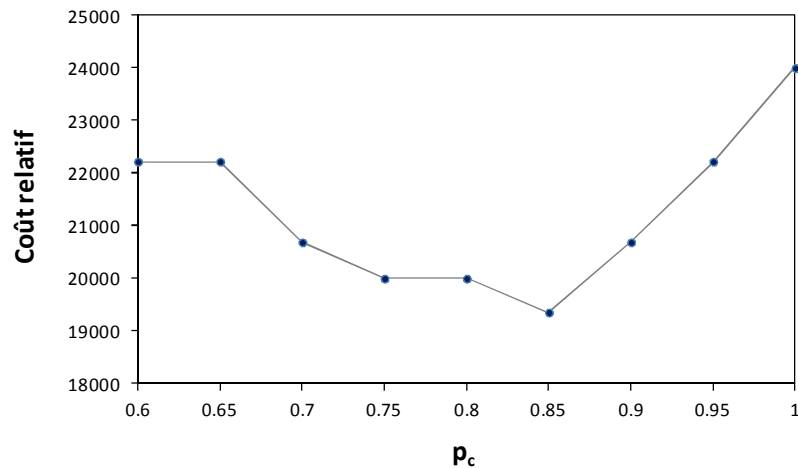


figure III-15 : Influence de la probabilité de croisement

Si ce résultat est en accord avec la valeur de p_c préconisée dans le travail de Montemurro [MONTEMURRO, 2012], la réponse de l'algorithme génétique à la variation de p_c observée dans les travaux de Le Riche et al. [LE RICHE, 1993] et Czarn et al. [CZARN, 2004] est linéaire. En effet, les auteurs observent une augmentation de la qualité de la solution obtenue avec l'augmentation de la probabilité de croisement. Cette différence peut être expliquée par le fait qu'il est impossible d'envisager la définition d'une probabilité de croisement universelle, celle-ci étant intrinsèquement liée aux paramètres (nature, nombre) qui définissent un individu dans l'espace de recherche [DREO, 2003].

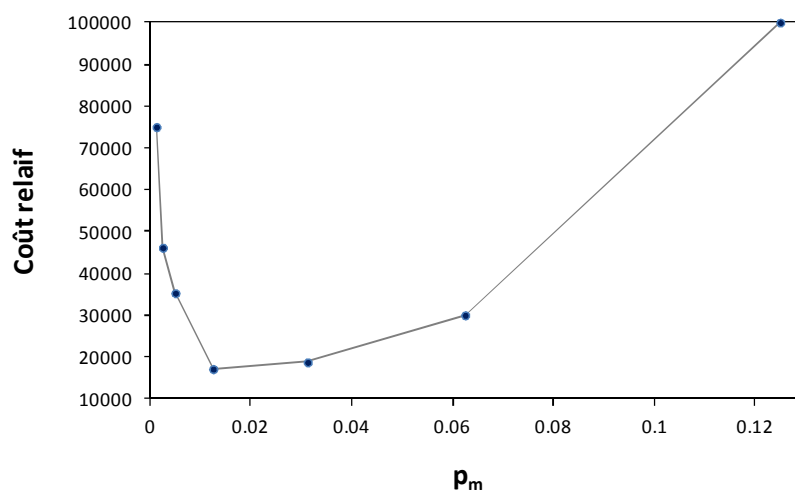


figure III-16 : Influence de la probabilité de mutation

La probabilité de mutation est ensuite étudiée (figure III-16). Le coût relatif du calcul est minimisé par une valeur de probabilité de mutation équivalente à $1/N_{ind}$ (soit 0,0125). Cette valeur correspond avec la valeur conseillée dans le travail de Montemurro [MONTEMURRO, 2012]. L'allure générale quadratique de la réponse du coût relatif vis-à-vis de l'évolution de la probabilité de mutation est en accord avec les allures générales observées dans les travaux précédents.

À présent, l'ensemble des paramètres agissant sur les individus d'une population ont été étudiés et fixés. La dernière partie de cette étude consiste à observer l'influence de l'opérateur d'échange entre les deux populations. Cet opérateur joue aussi un rôle important car il peut permettre à une population de s'extraire d'un optimum local ou d'être guidée vers une zone proposant des solutions plus optimisées. Cependant, si les populations échangent trop souvent, le bénéfice de disposer de deux populations explorant des zones distinctes pourrait être perdu favorisant une exploitation locale de l'espace de recherche au détriment de la diversification. Les résultats obtenus sont présentés en figure III-17. Le coût relatif de calcul y est ici minimisé lorsque les deux populations échangent toutes les 25 générations.

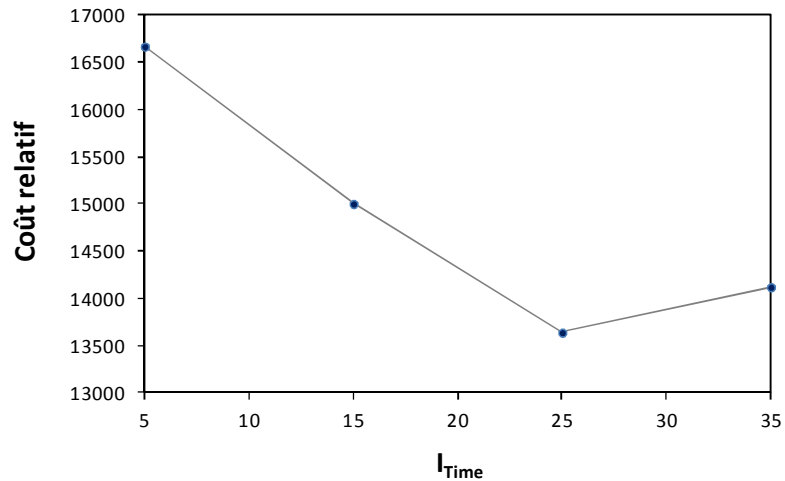


figure III-17 : Influence de l'opérateur d'échange inter-populations

L'ensemble des paramètres retenus à l'issue de cette étude paramétrique sont récapitulés dans le tableau ci-dessous.

| N_{pop} | N_{gen} | N_{ind} | p_c | p_m | l_{time} |
|-----------|-----------|-----------|-------|--------|------------|
| 2 | 150 | 80 | 0,85 | 0,0125 | 25 |

tableau III-5 : paramètres retenus à l'issue de l'étude

Le calcul génétique est à présent répété 100 fois à partir des paramètres précédemment identifiés. Les masses optimales obtenues par chacune des deux populations lors de chacune des 100 répétitions sont présentées figure III-18. Sur celle-ci est représentée en gris la zone d'optimisation recherchée. A partir de cette figure, il est possible d'observer que sur ces 100 répétitions, seulement 6 % des calculs génétiques ne voient pas leurs deux populations converger vers le même individu. En outre, 82 % des calculs proposent une solution située dans la zone d'optimisation définie comme acceptable au début de l'étude des paramètres génétiques.

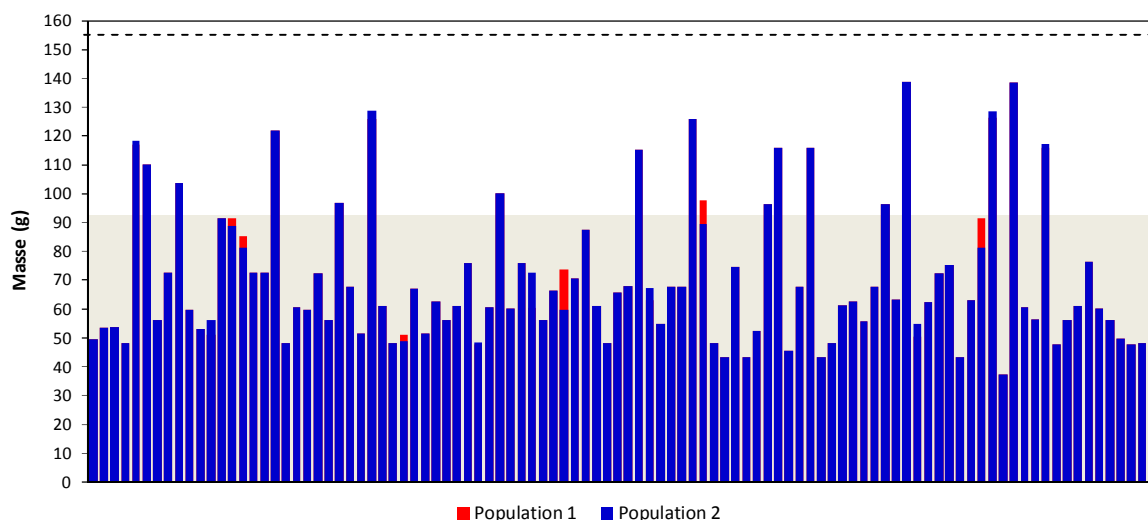


figure III-18 : Individus optimaux identifiées lors des 100 répétitions à partir de deux populations, en rouge la solution la moins performante des deux populations, en bleu la solution la plus performante des deux populations

Dans un espace de recherche constitué de $1,72.10^{48}$ combinaisons, les résultats précédents fournis par l'algorithme génétique permettent d'aborder avec confiance la résolution du problème de conception traité dans ce manuscrit.

III.3 La proposition de solutions

La suite de ce travail va maintenant porter sur la proposition de solutions optimisées en réponse, dans un premier temps, au problème de conception défini dans le cas d'étude préliminaire puis dans un second temps, en réponse au cahier des charges de l'application industrielle définie dans le chapitre précédent.

III.3.1 Résolution du cas d'étude préliminaire

Les courbes de convergence représentées en figure III-19 illustrent l'évolution de la masse pénalisée du meilleur individu de chaque population en fonction de l'évolution de l'algorithme.

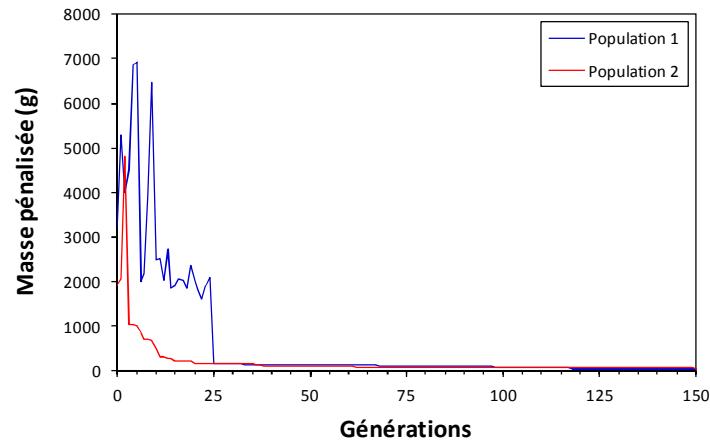


figure III-19 : Masse pénalisée en fonction de l'évolution des 2 populations

La masse pénalisée d'un individu (qui est la fonction objectif pénalisée) correspond à sa masse réelle sur laquelle est appliquée une pénalisation (une surévaluation ici) dans le cas de la non satisfaction d'une ou plusieurs contraintes du cahier des charges de manière à rendre l'individu non pertinent. Les allures des courbes représentant chacune des deux populations montrent une évolution anarchique en début de calcul traduisant que le meilleur individu de chacune des populations identifié ne respecte pas une ou plusieurs astreintes du cahier des charges et n'est donc pas conservé à la génération suivante.

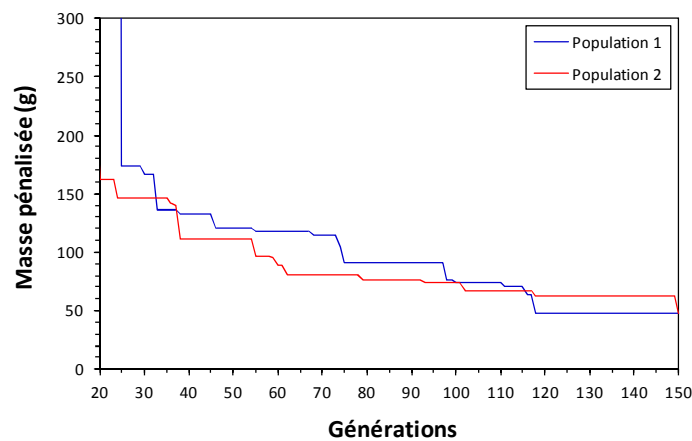


figure III-20 : Zoom de l'évolution de la masse pénalisée en fonction de l'évolution des 2 populations

Le premier individu satisfaisant l'ensemble des contraintes du cahier des charges est identifié à la 25^{ème} génération pour la première population et à la 20^{ème} génération pour la deuxième population. Dès lors, et ce jusqu'à la fin du calcul, les deux populations vont présenter une diminution de la masse pénalisée du meilleur individu identifié à chaque

génération (figure III-20).

La figure III-21 présente la masse des individus satisfaisant l'astreinte mécanique et électrique en fonction de l'évolution des générations et de la température calculée sur leur face inférieure. Cette figure permet de comprendre et de valider de manière plus précise le fonctionnement de l'algorithme. La zone délimitée par le cadre rouge sur la figure représente la zone dans laquelle un individu est solution au problème de conception, c'est-à-dire qu'il satisfait l'ensemble des astreintes du cahier des charges tout en proposant une masse inférieure à la masse de référence de 155g.

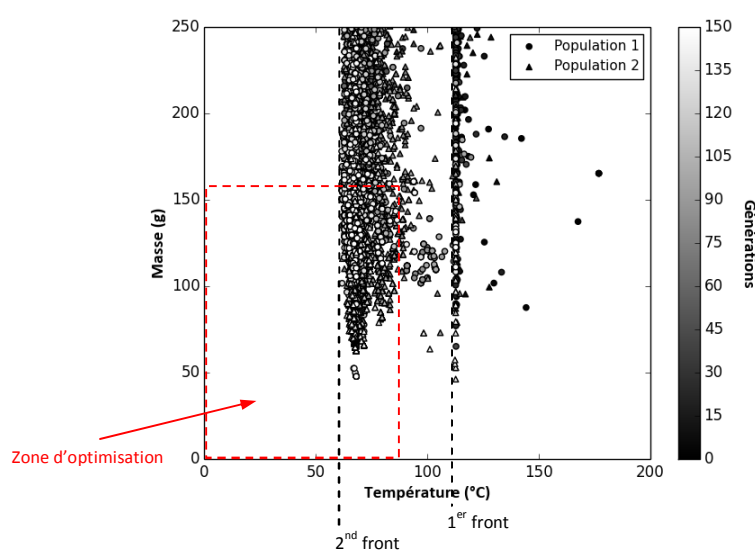


figure III-21 : Masse des individus explorés par l'algorithme génétique en fonction de la température sur la face inférieure de la plaque

Cette figure permet d'observer que plus la convergence de l'algorithme progresse, plus les individus tendent à être situés dans cette zone d'optimisation.

Les individus sélectionnés au cours du calcul d'optimisation forment deux fronts d'optimisation. Un premier front composé d'individus majoritairement explorés en début de calcul et un deuxième étant constitué par les dernières générations. La présence de ces deux fronts peut être expliquée par la formulation analytique de la température T_{FI} sur la face interne inférieure du multicouche exprimée par l'équation (III-2). La figure III-22 présente, pour plusieurs valeurs d'épaisseurs, l'évolution de la température de la face inférieure en fonction de l'évolution de la conductivité thermique dans le cas de plaques planes ne proposant de motifs spécifiques sur leur face supérieure.

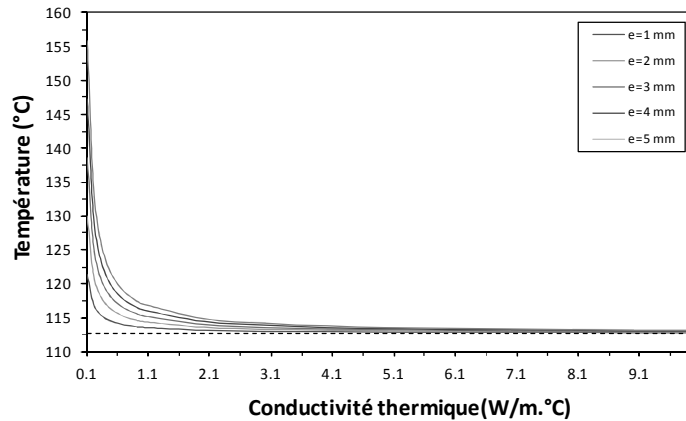


figure III-22 : Température vs conductivité thermique d'une plaque ne possédant pas de motif spécifique sur sa couche supérieure

Dans le cas d'une plaque ne possédant ni ailettes ni picots sur sa face supérieure, sa surface plane impose un coefficient de convection $h=16 \text{ W/m.K}$ dans les conditions de sollicitations thermiques définies. Ainsi, indépendamment de l'épaisseur et de la conductivité thermique, la température obtenue ne peut être inférieure à $112,1^\circ\text{C}$ en l'absence de motifs géométriques spécifiques favorisant la dissipation thermique. Si le premier front, figure III-21, correspond au front d'optimisation de bicouches non constitués d'un motif spécifique, le deuxième front correspond quant à lui au front d'optimisation de bicouches présentant sur leurs couches supérieures un motif géométrique spécifique type ailettes ou picots. A travers la présence de ces deux fronts d'optimisation, l'algorithme génétique démontre complètement sa capacité d'adaptation, au cours du calcul génétique, dans la proposition d'individus satisfaisant le cahier des charges.

Si la figure III-19 permet d'observer l'évolution du meilleur individu de chaque population au cours du calcul, elle ne donne pas d'informations sur les autres individus explorés au cours de l'évolution de l'algorithme génétique. En effet, 24000 individus sont identifiés lors du calcul d'optimisation (2 populations x 80 individus/pop x 150 générations). Sur l'ensemble de ces individus, 9739 proposent une masse inférieure à la masse de référence. Dans le but de limiter les solutions traitées, seules celles présentant un gain significatif de masse d'au moins 20% seront considérées. Ainsi :

- 3809 ne respectent pas au moins 20% de gain de masse et sont considérées comme non satisfaisantes ;
- 5930 sont elles des solutions satisfaisantes car respectant au moins 20 % de

gain de masse.

Sur les 5930 solutions précédemment identifiées toutes ne sont pas des propositions de couples architecture/matériaux différents. Des solutions peuvent différer uniquement parce que les valeurs des paramètres géométriques définissant les motifs des couches sont différentes. Ces 5930 solutions sont construites à partir de 75 couples architecture/matériaux pour lesquels plusieurs jeux de paramètres géométriques permettent d'obtenir une solution au problème de conception. Il paraît alors intéressant d'identifier les 75 couples architecture/matériaux distincts parmi l'ensemble des solutions proposées (figure III-23).

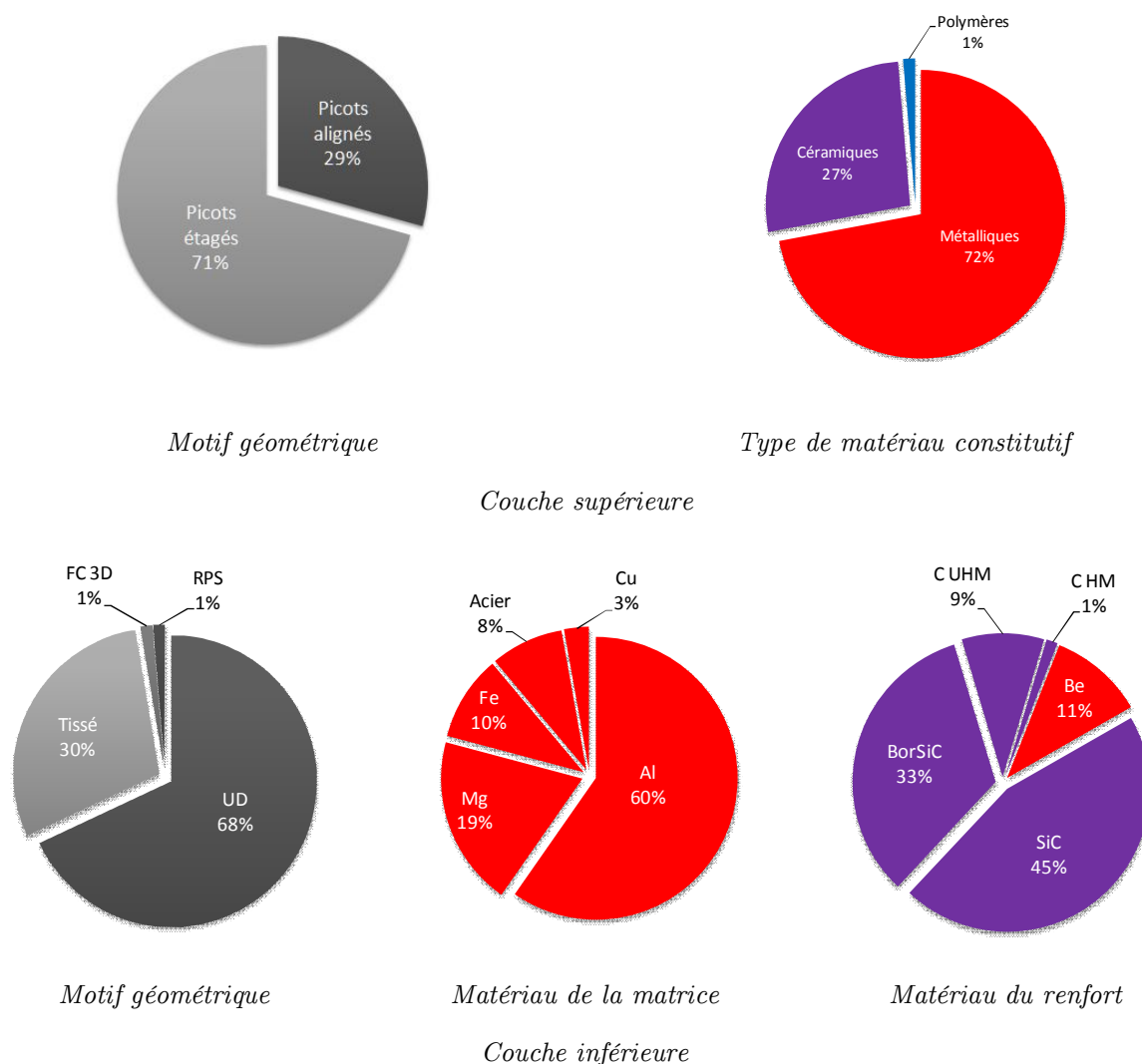


figure III-23 : Couples architecture/matériaux solutions

avec UD : Composite à renforts unidirectionnels

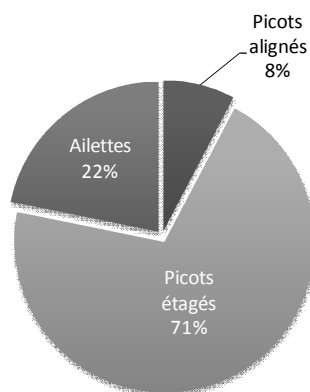
RPS : Composite à renforts particuliers sphériques

FC 3D : Composite renforcé par des fibres courtes aléatoirement orientées

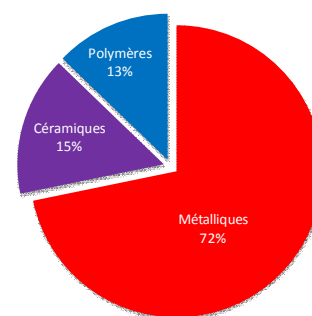
Des tendances nettes peuvent être ici soulignées parmi lesquelles :

- 100 % des motifs utilisés sur la couche supérieure du multicouche sont des motifs « picots » ;
- 72 % des matériaux utilisés dans la couche « picots » sont des matériaux métalliques parmi lesquels le magnésium est le plus représenté (83 %) ;
- 100 % des motifs utilisés sur la couche inférieure du multicouche sont des motifs « composites » ;
- 100 % des matrices utilisées dans la couche composite sont des matrices métalliques parmi lesquelles l'alliage d'aluminium et les alliages de magnésium sont largement représentés (79 %) ;
- 89 % des renforts utilisés dans la couche composite sont des renforts céramiques parmi lesquels les renforts SiC sont les plus proposés (45 %)

Ces résultats peuvent être confortés par l'analyse des couples architecture/matériaux de chaque meilleur individu obtenu lors des 100 répétitions nécessaires à la validation de l'étude des paramètres génétiques (figure III-24).



Motif géométrique



Type de matériau constitutif

Couche supérieure

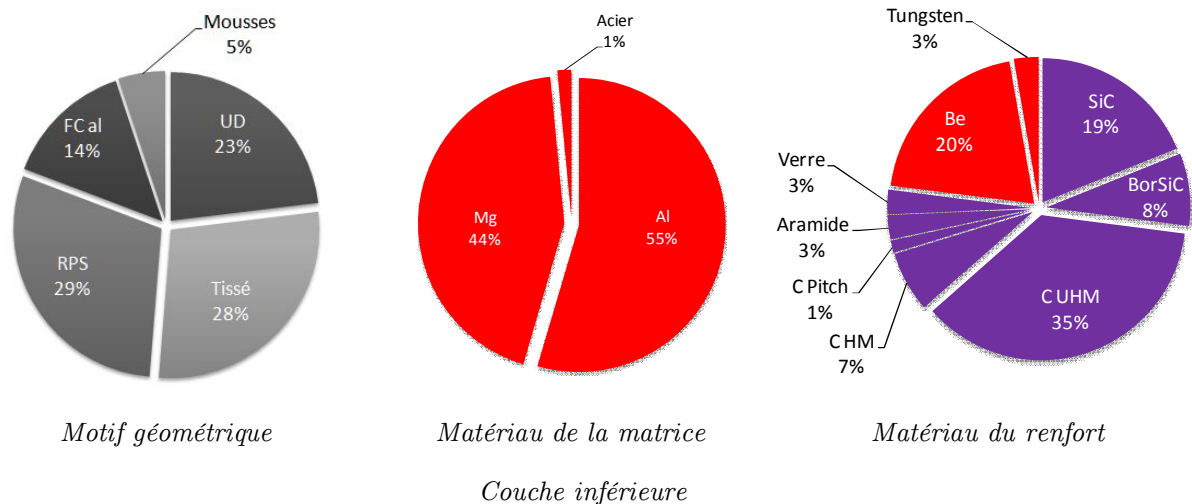


figure III-24 : Couples architecture/matériaux des meilleurs individus lors des 100 calculs effectués

avec UD : Composite à renforts unidirectionnels

Tissé : Composite à renfort bi-axial $0^\circ/90^\circ$

RPS : Composite à renforts particuliers sphériques

FC 3D : Composite renforcé par des fibres courtes aléatoirement orientées

Ici, 78 couples architecture/matériaux distincts ont été identifiés. Les tendances observées en termes de propositions de solutions multimatériaux si l'on considère les meilleurs individus de chacun des 100 calculs et celles observées lors d'un calcul de résolution du cas d'étude préliminaire sont sensiblement les mêmes. Cela valide, que si le chemin emprunté lors de la convergence de l'AG est intrinsèquement lié aux populations de départ aléatoirement sélectionnées, les paramètres génétiques choisis assurent bien sur un calcul une représentativité des solutions d'arrivée équivalente à celle obtenue lors de la répétition de 100 calculs.

Enfin, la solution optimale proposée par l'algorithme génétique lors de la résolution du cas d'étude préliminaire peut être détaillée. Cette solution, possédant une masse de 47,8 g, est un bicouche constitué de picots étagés en alliage de magnésium sur sa couche supérieure et d'une couche inférieure composite composée d'une matrice magnésium renforcée par des fibres unidirectionnelles de carbone ultra-haut module (figure III-25).

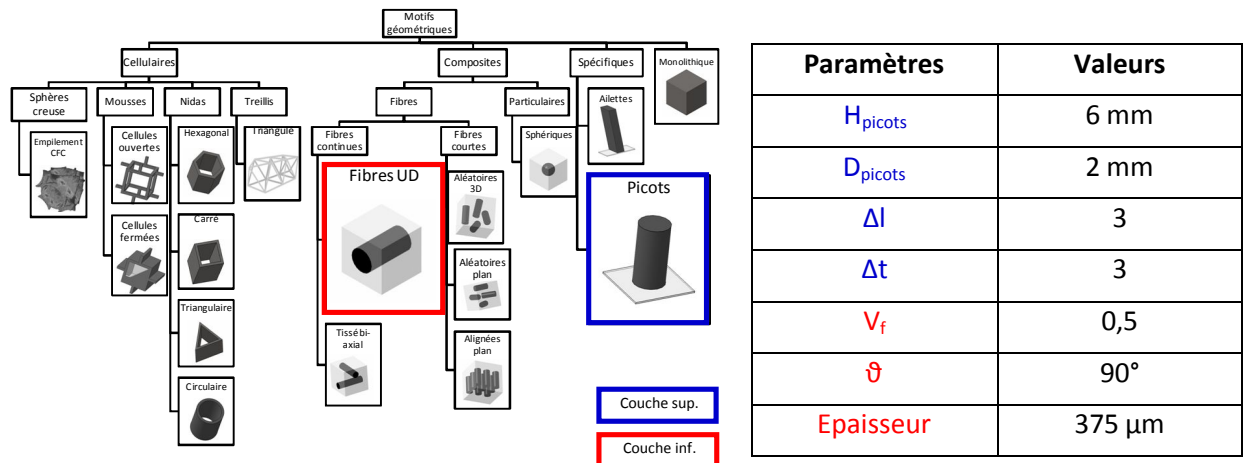


figure III-25 : Paramètres physiques et géométriques de la solution optimale obtenue.

Il est intéressant de noter que, parmi les paramètres physiques et géométriques de cette solution récapitulés ci-dessus, les fibres unidirectionnelles sont placées dans la direction de chargement, c'est-à-dire la direction transversale du plan de la plaque. L'algorithme génétique démontre ainsi une fois de plus sa capacité à s'adapter aux contraintes définies dans le cahier des charges.

Les compatibilités entre les matériaux (compatibilité entre la fibre et la matrice par exemple) ainsi que le procédé de fabrication associé au multimatériau ne sont pas pris en compte dans ce travail. Ainsi, le choix du magnésium par exemple peut être discuté. La proposition de ce matériau utilisé dans de nombreuses solutions identifiées en tant que matrice métallique de la couche composite peut être critiquée au vu de sa haute inflammabilité et des risques de couplage galvanique. Cependant, le travail de Ye et al. [YE, 2004] ou de Jiang et al. [JIANG, 2003] montrent l'évolution apportée ces dernières années dans la formulation d'alliages à base de magnésium permettant ainsi leur utilisation comme matrice dans des composites utilisés dans des domaines de hautes technologies comme l'aéronautique ou l'aérospatiale. La non prise en compte des compatibilités entre matériaux ou des procédés de mise en œuvre constitue des hypothèses fortes qui amènent à proposer des solutions actuellement discutables, il n'est cependant pas possible de présumer des développements futurs amenant à reconsidérer certaines compatibilités et à construire des procédés de fabrication encore en développement aujourd'hui.

III.3.2 Résolution du cas d'étude industriel

Dans le chapitre précédent, il a été démontré que la résolution du cas d'étude industriel impose le recours à des simulations numériques du fait de la complexité des phénomènes physiques mis en jeu. Ces simulations numériques permettent l'évaluation de la température au centre de la face inférieure du multicouche et de la fréquence de vibration du premier mode.

La première difficulté de cette résolution vient de la cohabitation de différents langages de programmation possédant des temps d'exécutions sensiblement différents. Ainsi, un travail sur l'implémentation du code de calcul a permis la proposition d'un schéma de programmation (figure III-26) basé sur :

- la communication de différents langages de programmation permettant la synchronisation de leurs données ;
- la parallélisation des exécutions des simulations numériques permettant une diminution du temps d'exécution de chaque itération du calcul.

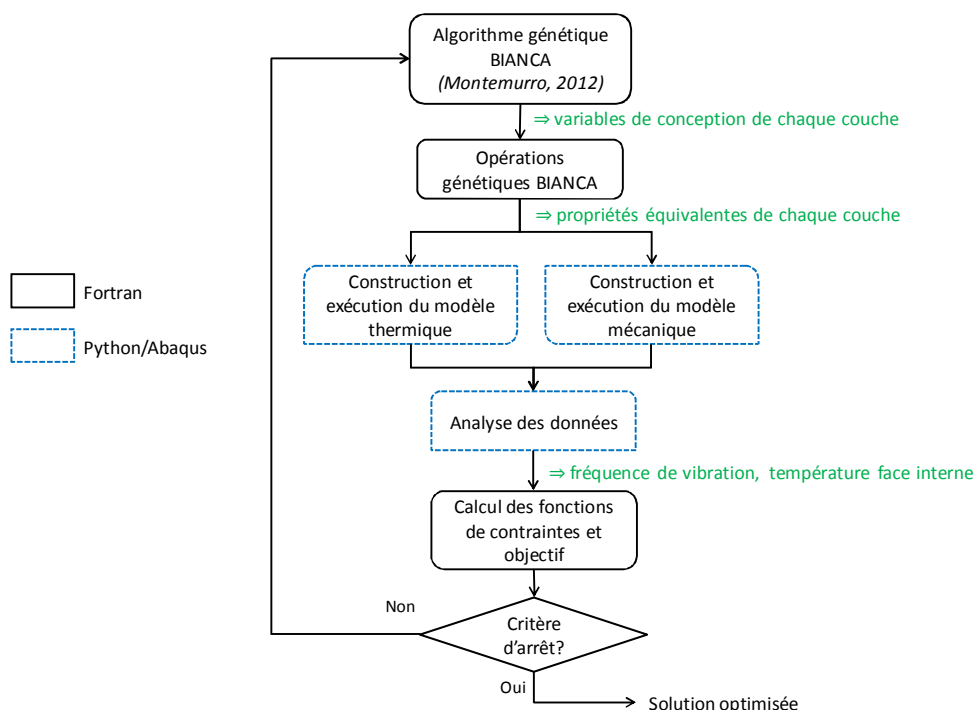


figure III-26 : Schéma de programmation utilisé dans la résolution du cas d'étude industriel

Au-delà du schéma de programmation proposé ci-dessus, la figure illustre comment

la résolution du problème d'optimisation fait intervenir dans ce travail une évaluation multi-échelle des propriétés du multicouche :

- une évaluation analytique des propriétés homogénéisées de chaque couche ;
- une évaluation numérique des performances du capot supérieur.

Le calcul d'optimisation a été exécuté à partir des paramètres génétiques définis dans l'étude paramétrique précédemment menée. Le calcul a nécessité 24000 boucles, soit 48000 simulations numériques, et a été réalisé en 5 jours et 3 heures.

La figure ci-dessous présente l'évolution du meilleur individu de chaque génération et de chaque population.

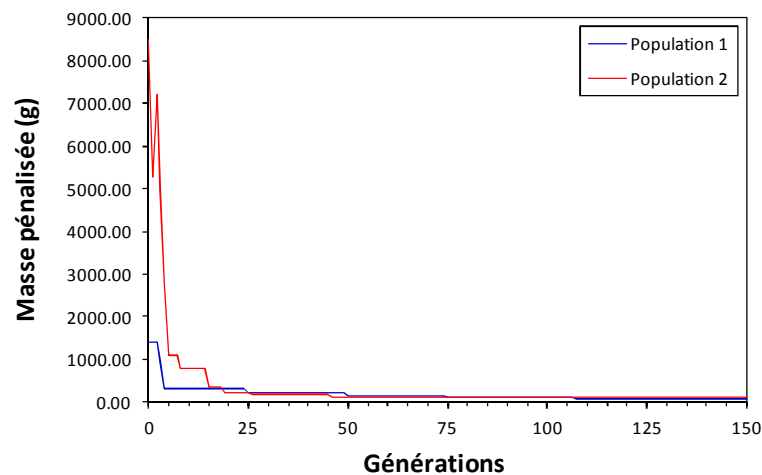


figure III-27 : Masse pénalisée en fonction de l'évolution des 2 populations

Une solution est un individu satisfaisant l'ensemble des contraintes du CdC proposant au moins 20% de gain de masse. Dès la 46^{ème} génération (soit environ à 1/3 du calcul d'optimisation), des individus explorés par l'algorithme génétique proposent un gain de masse vis-à-vis de la solution de référence. Lors de la convergence de l'algorithme, 2840 individus permettent un gain de masse dont 1572 sont solutions. Parmi elles, 1566 individus sont solutions, proposant un gain de masse compris entre 20 et 40% tandis que 6 proposent un gain de masse supérieur à 40%.

Sur l'ensemble de ces solutions, l'algorithme génétique a permis l'identification de 36 couples architecture/matériaux distincts. Les solutions multimatériaux sont

uniquement composées de picots étagés sur leur couche supérieure (figure III-28).



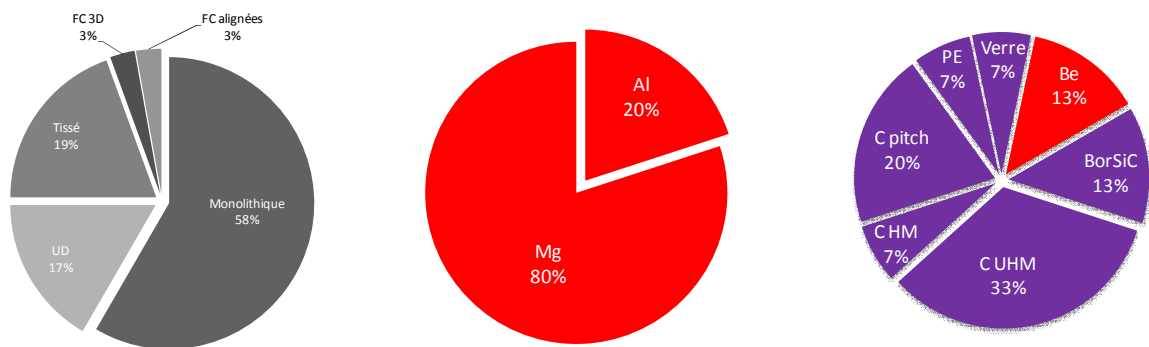
Motif géométrique

Type de matériau constitutif

figure III-28 : Couples motif géométrique/matériau de la couche supérieure des solutions identifiées

Concernant leur composition, 92% des picots sont en alliages métalliques parmi lesquels un seul est en alliage d'aluminium (les autres étant en alliage de magnésium).

Concernant la composition de la couche inférieure, deux classes de motifs géométriques distinctes sont proposées : la classe des motifs monolithiques et celle des composites (figure III-29).



Motif géométrique

Matériau de la matrice

Matériau du renfort

figure III-29 : Couples motif géométrique/matériau de la couche inférieure des solutions identifiées

avec UD : Composite à renforts unidirectionnels

Tissé : Composite à renfort bi-axial 0°/90°

FC alignées : Composite renforcé par des fibres courtes alignées

FC 3D : Composite renforcé par des fibres courtes aléatoirement orientées

Lorsque la couche inférieure est constituée d'un motif monolithique, 71% de celles-ci sont composées d'alliage de magnésium tandis que les autres solutions (29%) sont composées d'alliage d'aluminium. Ces solutions ont été dominantes jusqu'à la 108^{ème} génération. L'algorithme a par la suite identifié les motifs géométriques de la classe des composites comme plus performantes. Plusieurs types de renforts sont ainsi proposés : les fibres continues unidirectionnelles, les renforts tissés bi-axiaux et les fibres courtes (aléatoirement orientées ou alignées). Ces renforts sont essentiellement céramiques (seulement 2 sont des fibres de béryllium) et sont majoritairement des fibres de carbone (60% des fibres proposées sont des fibres de carbone). Concernant les matrices métalliques associées, 100% sont des alliages métalliques, majoritairement des alliages de magnésium.

Les deux populations ne convergent pas vers le même individu bien qu'elles évoluaient vers le même meilleur individu jusqu'à la 106^{ème} génération. Par la suite, la proposition d'un motif composite sur la couche inférieure du multimatériau va permettre à la population 1 de continuer d'évoluer tandis que la population 2 ne proposera elle plus de nouvel individu optimisé.

La solution optimale identifiée par la population 1 est constituée de picots étagés sur sa couche supérieure et d'une couche composite à matrice magnésium renforcée par des fibres continues tissées bi-axiales de carbone UHM. Cette solution possède une masse de 74,6g. La solution optimale identifiée par la population 2 est elle aussi constituée de picots étagés sur sa couche supérieure associée à une couche monolithique d'alliage de magnésium sur la couche inférieure. Cette solution possède une masse de 98,65g. Les détails des solutions optimales de chaque population sont présentés dans le tableau III-6.

| | Population 1 | | Population 2 | |
|--------------------------|---------------------|-------------------|---------------------|--------|
| Couche supérieure | H_{picots} | 6 mm | H_{picots} | 6 mm |
| | D_{picots} | 2 mm | D_{picots} | 2 mm |
| | Δl | 2 | Δl | 2 |
| | Δt | 3 | Δt | 3 |
| Couche inférieure | V_f | 0,5 | Epaisseur | 1,5 mm |
| | ϑ | 0° | | |
| | Epaisseur | 750 μm | | |
| Masse (g) | 74,6 | | 98,65 | |

tableau III-6 : Paramètres physiques/géométriques des solutions optimales de chaque population

Les compatibilités entre les matériaux constitutifs des solutions multimatériaux ne seront pas discutées. Le travail de Dermarkar [DERMARKAR, 1990] peut apporter des éléments de réponses sur les compatibilités entre matériaux et sur la faisabilité des matériaux composites à matrice métallique. Dans son étude, plusieurs matrices métalliques y sont envisagées (aluminium, magnésium, titane...) associées à différents renforts (essentiellement céramiques).

III.4 Conclusion

L'objectif de ce chapitre a été de proposer un outil permettant une sélection simultanée d'un couple architecture/matériaux. Les algorithmes génétiques ont été l'outil privilégié du fait de leur capacité à identifier des solutions en réponse à des problèmes d'optimisation traitant des variables aussi bien continues que discrètes. L'efficacité de la convergence d'un algorithme génétique dépend directement de la définition de ses paramètres génétiques. Une étude paramétrique de l'algorithme a ainsi permis de mieux appréhender sa capacité d'exploration de l'espace de recherche. La démarche mise en place dans le cadre de cette étude paramétrique, associée à des critères de choix aussi bien qualitatifs que quantitatifs, a permis de déterminer un jeu de paramètres assurant une convergence acceptable et maîtrisée de l'algorithme. A travers la proposition de solutions au cas d'étude préliminaire, basé sur une résolution totalement analytique du problème de conception, mais aussi au cas d'étude industriel, basé sur une modélisation multi-échelle du multimatériau, l'algorithme génétique a démontré sa capacité à converger vers des

solutions optimisées respectant ainsi l'objectif de conception.

Si l'utilisation d'un algorithme génétique permet la proposition d'une solution optimisée dans la résolution de problème d'optimisation combinatoire, l'analyse des individus identifiés lors de sa convergence permet d'étendre la proposition de couple architecture/matériaux solutions. Cependant, que se passe-t-il à présent si le concepteur souhaite :

- qualifier la solution optimale proposée par l'algorithme génétique ? Il est impossible en effet de qualifier les solutions proposées par l'algorithme génétique vis-à-vis de l'optimum global du problème de conception sans balayage de l'espace de recherche. Si cette exploitation complète n'est pas envisageable du fait des temps de calcul impliqués, une recherche locale exhaustive autour de solutions proposées peut permettre leur qualification vis-à-vis des optimums locaux de cet espace de recherche. Cette recherche locale exhaustive peut être menée à partir de l'utilisation d'un algorithme déterministe autour de solutions identifiées par l'algorithme génétique ;
- proposer des solutions architecture/matériaux variées ? L'analyse des individus parcourus par l'algorithme lors d'un calcul est une première aide vers l'identification de plusieurs couples architecture/matériaux solutions. La proposition de couples architecture/matériaux variés peut être effectuée à partir d'une démarche itérative dans laquelle des solutions, identifiées à partir de critères aussi bien qualitatifs que quantitatifs, sont exclues de l'espace de recherche

Le chapitre suivant se concentrera sur les problématiques levées par ces deux enjeux en traitant à la fois le cas d'étude préliminaire et le cas industriel.

CHAPITRE IV

PROPOSITION D'UNE DEMARCHE HYBRIDE D'EXPLORATION

Les algorithmes génétiques sont en mesure de proposer une aide à la conception dans le choix des nombreux composants et paramètres qui définissent un multimatériau. Il est cependant difficile de savoir si les solutions proposées par ce type d'algorithme sont réellement les plus performantes. Ainsi, la première partie de ce chapitre vise à mettre en place une stratégie d'hybridation dans le but d'utiliser les individus explorés par l'algorithme génétique comme le point de départ d'une cartographie locale de l'espace de recherche. Le concepteur doit souvent faire des choix en lien avec le savoir-faire d'une entreprise ou des exigences spécifiques en matière de matériaux et/ou de procédés de mise en œuvre. Une démarche de conception doit donc permettre de proposer des solutions variées sur un plan matériau autant que sur un plan architecture. La deuxième partie de ce chapitre est donc consacrée à la définition et à l'application d'une démarche de recherche basée sur une exploitation méthodique de l'espace des solutions.

IV PROPOSITION D'UNE DEMARCHE HYBRIDE D'EXPLORATION

| | |
|---|-----|
| IV.1 Hybridation de l'algorithme génétique | 133 |
| IV.1.1 Les stratégies d'hybridation | 133 |
| IV.1.2 Les méthodes exactes | 137 |
| IV.1.3 Application de la stratégie d'hybridation..... | 142 |
| IV.2 Démarche d'exploitation de l'espace de recherche | 160 |
| IV.2.1 La démarche proposée | 160 |
| IV.2.2 Les critères de diminution de l'espace de recherche..... | 163 |
| IV.3 Conclusion | 174 |

IV.1 Hybridation de l'algorithme génétique

Les heuristiques et métaheuristiques constituent un ensemble de méthodes performantes dans la recherche de solutions à des problèmes de conception présentant des espaces de recherches de grande taille. Adoptant une stratégie de recherche locale ou préférant une recherche globale, chacune de ces méthodes présente des avantages et des inconvénients. Une exploration hybride, combinant à la fois recherche locale et exploration globale, peut permettre de proposer une amélioration dans l'exploitation de l'espace de recherche.

IV.1.1 Les stratégies d'hybridation

L'hybridation est définie comme une stratégie de combinaison de deux méthodes différentes afin de tirer avantage de chacune d'entre elles. A travers la combinaison d'une méthode non déterministe et d'un algorithme de recherche local, le travail de Glover [GLOVER, 1977] est cité comme une des premières études à proposer une démarche hybride même si à cette période, ce type de stratégie ne suscite que peu d'intérêt. Cependant, l'hybridation est devenue ces dernières années un processus déterminant dans l'amélioration et la mise en valeur des algorithmes d'optimisation.

Les stratégies d'hybridation peuvent être divisées en deux grandes familles :

- l'hybridation d'une métaheuristique avec une métaheuristique ;
- l'hybridation d'une métaheuristique avec une méthode exacte.

IV.1.1.1 Hybridation d'une métaheuristique avec une métaheuristique

Les travaux de Talbi et al. [TALBI, 2002] proposent une classification reconnue et largement reprise des différents types d'hybridation. Permettant une comparaison qualitative des métaheuristiques, cette classification comporte deux aspects (figure IV-1) :

- une classification hiérarchique permettant dans un premier temps d'identifier la structure de l'hybridation ;
- une classification à plat spécifiant les détails des métaheuristiques impliquées dans l'hybridation.

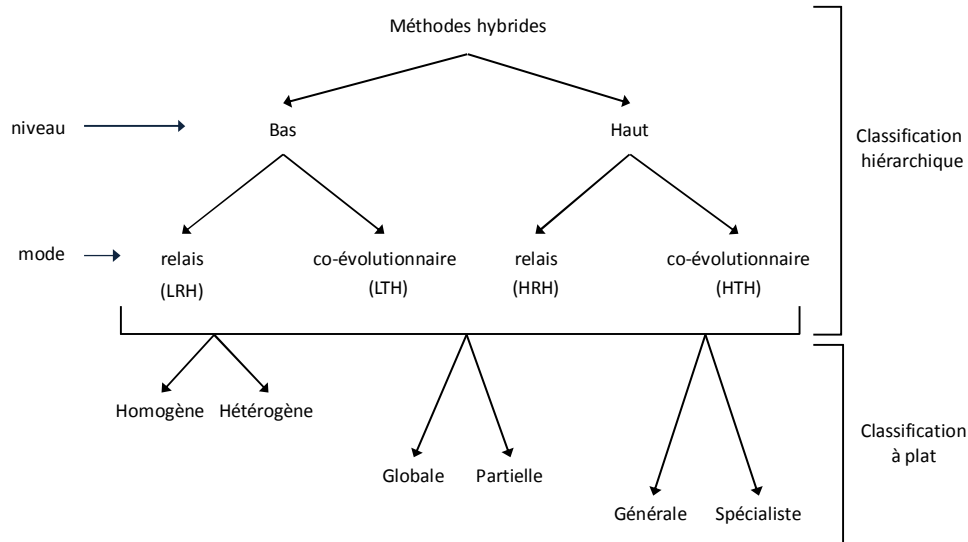


figure IV-1 : Classification des méthodes hybrides métaheuristiques/métaheuristiques, d'après Talbi et al.

[TALBI, 2002]

i. Classification hiérarchique

La classification hiérarchique est définie par le niveau haut ou bas et le mode d'hybridation. Dans le niveau bas de l'hybridation, une métaheuristique remplace une des fonctions d'une autre métaheuristique qui l'englobe. Dans le niveau haut, chaque métaheuristique évolue de manière indépendante. A ce stade de la classification, aucune information n'est donnée sur les relations qui lient les méthodes. Ainsi, à chaque niveau d'hybridation sont associés deux modes de coopération: le mode relais et le mode co-évolutionnaire. En mode relais, les méthodes sont exécutées de manière séquentielle, l'une utilisant le résultat de la précédente comme entrée. Quand les différentes méthodes sont exécutées de manière parallèle, on parle de mode co-évolutionnaire.

ii. Classification à plat

La classification à plat des métaheuristiques est définie dans le travail de Talbi et al. [TALBI, 2002]. Les auteurs distinguent les méthodes hybridées selon leur domaine d'application et la nature de leurs fonctions. Le type d'hybridation différencie les méthodes selon qu'elles sont :

- homogènes ou hétérogènes. Une méthode hybridée homogène utilise la même métaheuristique tandis qu'une méthode hybridée hétérogène utilise des métaheuristiques différentes ;

- globale ou partielle. Une méthode hybride est qualifiée de globale lorsque l'ensemble des métaheuristiques qui la compose est appliqué à la recherche d'une solution sur l'ensemble de l'espace de recherche. A contrario, une méthode hybride partielle décompose l'espace de recherche en sous-espaces associés à une métaheuristique qui compose la méthode hybride ;
- généraliste ou spécialiste. L'hybridation est qualifiée de généraliste quand toutes les métaheuristiques hybridées sont appliquées à la résolution du même problème d'optimisation tandis que dans une hybridation spécialiste, les métaheuristiques qui la composent traitent des problèmes d'optimisation différents.

IV.1.1.2 Hybridation d'une métaheuristique avec une méthode exacte

Une classification des stratégies d'hybridation de méthodes exactes et de métaheuristiques reprenant le schéma de celle proposée par Talbi et al. [TALBI, 2002] est présentée dans le travail de Jourdan et al. [JOURDAN, 2009]. Dans cette classification, on retrouve deux aspects (classification hiérarchique et classification à plat), la classification hiérarchique distinguant quatre catégories :

- bas niveau/relais : cette hybridation peut faire intervenir par exemple une métaheuristique qui guiderait la stratégie d'exploration d'une méthode exacte ;
- bas niveau/co-évolutionnaire : on parlera de ce type d'hybridation par exemple lors de l'emploi d'un algorithme mémétique (algorithme génétique dans lequel un opérateur est remplacé par une méthode exacte) ou lorsqu'une métaheuristique sera employée pour l'exploration d'un espace de recherche défini par une méthode exacte ;
- haut niveau/relais : schéma de coopération le plus représentatif des méthodes hybrides utilisées [JOURDAN, 2009], elle fait intervenir de manière séquencées des méthodes autonomes. Ceci peut être le cas lorsqu'une métaheuristique donne par exemple l'information des bornes d'exploration d'une méthode exacte ;

- haut niveau/co-évolutionnaire : dans ce type de coopération, les méthodes seront lancées de manière autonome autorisant l'échange d'informations.

IV.1.1.3 Le choix d'une stratégie d'hybridation

La présentation des stratégies d'hybridation apporte des éléments de réponse dans le choix d'une stratégie pour l'exploration plus exhaustive ou performante de l'espace de recherche de problèmes d'optimisation combinatoire. Le travail proposé dans ce manuscrit a pour le moment exploité un algorithme génétique dans la recherche d'un couple architecture/matériaux en réponse au cahier des charges.

Le chapitre précédent a permis de valider la capacité de l'algorithme génétique à fournir une solution à travers l'exploration d'un vaste espace de recherche. Deux objectifs ont alors été définis :

- si la qualification d'une solution identifiée vis-à-vis de l'optimum global est impossible, il paraît intéressant de la qualifier vis-à-vis de l'optimum local de l'espace de recherche dans lequel elle se trouve (figure IV-2a) ;
- explorer localement l'espace de recherche autour d'individus identifiés par l'algorithme génétique (figure IV-2b).

La stratégie adoptée dans ce manuscrit est une stratégie hybride de recherche locale exacte au voisinage d'individus identifiés lors de l'exécution de la métaheuristique. Les deux méthodes vont évoluer de manière autonome donc on se situera dans un niveau haut de la classification. L'exploration locale devra attendre la fin de l'identification d'individus par l'AG donc les deux méthodes seront exécutées en mode relais. On retrouve par exemple ce type de démarche dans les travaux de Burke et al. [BURKE, 2001]. Les auteurs y expliquent comment l'hybridation d'une méthode exacte au voisinage de solutions identifiées par un algorithme de recherche globale permet d'élargir, voire même d'améliorer la proposition des solutions.

Spécifiquement, l'objectif de ce travail est de tirer avantage de la capacité d'exploration de l'algorithme génétique dans ce vaste espace de recherche et de se servir de certains individus identifiés par l'AG comme point de départ de recherches locales à l'aide d'une méthode exacte. Cette recherche hybride, basée sur l'association d'un AG et d'une

méthode exacte, peut s'effectuer de manière séquentielle à l'image du travail présenté par Nagar et al. [NAGAR, 1995] appliqué à un problème d'ordonnancement bi-critères ou de manière intégrative comme dans le travail de Puchinger et al. [PUCHINGER, 2004] appliqué à un problème de découpe de motifs dans une plaque de verre dans le but de limiter les déchets.

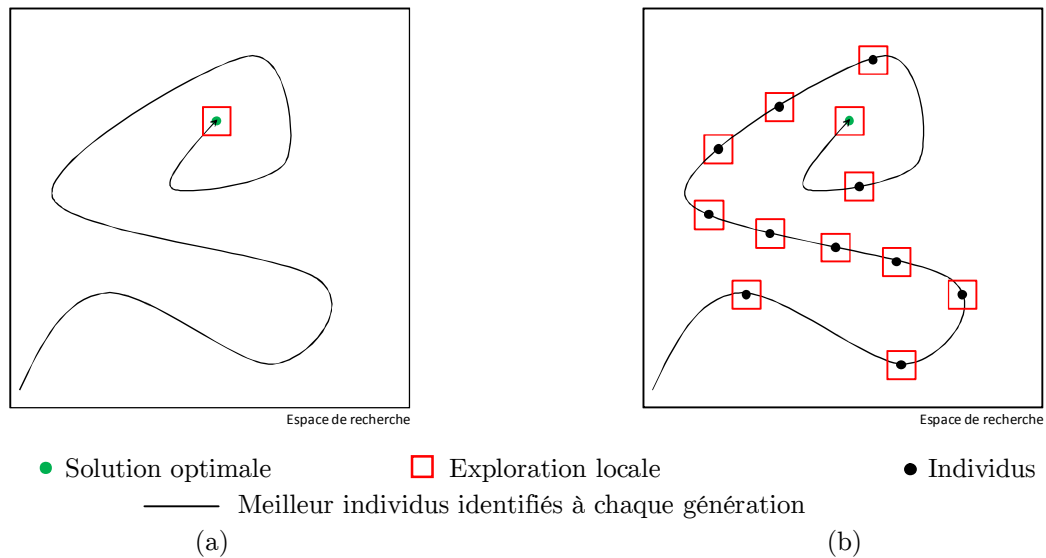


figure IV-2 : Schématisation de l'exploration locale associée à l'évolution de l'algorithme génétique meilleur individu

Indépendamment de la façon dont ces deux algorithmes sont exécutés, cette association permettra de proposer une cartographie précise de l'espace local, à la fois autour de la solution optimale proposée par l'AG (figure IV-2a), mais aussi autour des individus identifiés lors de sa convergence (figure IV-2b).

IV.1.2 Les méthodes exactes

L'efficacité des méthodes exactes est axée autour de leur capacité d'évaluation rapide de la fonction objectif. La recherche d'un extremum d'une fonction f revient à résoudre un système de n équations à n inconnues :

$$\frac{\partial f}{\partial x_i}(x_1, \dots, x_n) = 0 \text{ quelque soit } i=1 \text{ à } n \quad (\text{IV-1})$$

La classe des méthodes exactes est constituée par des grandes familles

d'algorithmes d'optimisation parmi lesquels on retrouve par exemple les algorithmes basés notamment sur des méthodes de gradients, d'arborescences ou encore de satisfaction de contraintes.

IV.1.2.1 Quelques méthodes déterministes usuelles

Le choix a été fait de sélectionner et de présenter le principe général de certaines méthodes déterministes largement reconnues dans la littérature.

Le travail de Borne et al. [BORNE, 2013] pourra apporter des éléments de réponse au lecteur souhaitant une vision plus exhaustive des algorithmes déterministes disponibles ou de leurs principes de fonctionnement.

i. Algorithme du simplexe

L'algorithme du simplexe est une des méthodes les plus communément utilisée pour résoudre les problèmes de programmation linéaire. Introduite en 1947 par George Dantzig, cette méthode a été par la suite sujette à de nombreuses améliorations en termes de performance et de stabilité. L'algorithme du simplexe évolue selon deux processus distincts :

- l'initialisation : l'algorithme se place sur un des sommets du simplexe ;
- la progression : l'algorithme se déplace le long d'une arête jusqu'au sommet suivant. Ce déplacement doit garantir au moins le maintien voire l'amélioration du résultat de la fonction objectif. Les déplacements gérés par l'algorithme garantissent une proximité de la solution proposée vis-à-vis de la solution optimale. Cette étape est ensuite répétée jusqu'à une dégradation du résultat sur les points examinés.

ii. Algorithme du Branch and Bound

L'algorithme Branch and Bound, aussi appelé algorithme de séparation et évaluation, repose sur une méthode arborescente de recherche d'une solution optimale. Basé sur l'évolution de l'exploration de l'espace des solutions, espace des solutions représenté par les subdivisions de l'arborescence, l'algorithme branch and bound nécessite trois étapes :

- la séparation : cette étape consiste à diviser l'espace de recherche en sous-espaces. En gardant la meilleure solution trouvée issue des sous-problèmes traités, on est assuré d'avoir résolu le problème initial. Cela revient à construire un arbre permettant d'énumérer toutes les solutions. L'ensemble des nœuds de l'arbre qu'il reste encore à parcourir étant susceptible de contenir une solution optimale, c'est-à-dire encore à diviser, est appelé ensemble des nœuds actifs ;
- la stratégie de parcours (ou règle de dominance): cette stratégie, en favorisant soit la largeur (diversification), la profondeur (intensification) va définir le chemin emprunté pour l'exploitation de l'arbre de recherche ;
- l'évaluation : l'évaluation permet de réduire l'espace de recherche en éliminant quelques sous-ensembles qui ne contiennent pas la solution optimale. Cette technique permet ainsi d'évaluer l'intérêt de l'exploration par l'algorithme d'un sous-ensemble de l'arborescence.

L'algorithme va ainsi procéder de manière itérative jusqu'à l'exploration de l'ensemble de l'arborescence assurant l'exhaustivité de la recherche proposée ainsi que l'optimalité de la solution identifiée.

iii. Algorithme du gradient

Introduit par Augustin Louis Cauchy en 1847, cet algorithme, de par ses formulations théoriques et les règles mathématiques qui le gouvernent, sert de modèle à la famille des algorithmes de descente. Aussi appelé algorithme de la plus forte pente (« *steepest descent algorithm* »), l'algorithme du gradient est un algorithme d'optimisation destiné à minimiser une fonction réelle différentiable définie sur un espace euclidien. Cet algorithme utilisé pour la résolution de problèmes d'optimisation sans contraintes a été la source de nombreuses extensions comme l'algorithme du gradient à pas maximal ou l'algorithme du gradient conjugué. L'évolution itérative de l'algorithme du gradient vers une solution optimisée est basée sur deux principes :

- le calcul d'une direction de descente ;
- la détermination d'un pas de descente permettant la proposition d'un nouveau point courant.

iv. Algorithme de programmation par contraintes

Une grande sous-famille des méthodes déterministes est constituée de méthodes s'appuyant sur la satisfaction des contraintes du problème d'optimisation. En programmation par contraintes (PPC), une distinction est faite entre la partie modélisation du problème à l'aide des problèmes de satisfaction de contraintes (« Constraint Satisfaction Problem (CSP) »), et la partie résolution à l'aide de solveurs dont le rôle est une utilisation active des contraintes du problème pour réduire la taille de l'espace des solutions à parcourir. Apparue dans les années 1980 pour la résolution de problèmes combinatoires de grandes tailles tels que les problèmes de planification et d'ordonnancement, la programmation par satisfaction de contraintes est basée sur l'expression d'un problème sous forme de contraintes. La programmation par satisfaction de contraintes considère un problème de conception à partir de la définition de :

- variables dans des domaines finis de valeurs;
- contraintes restreignant les valeurs possibles des variables dans leurs domaines en fonction des valeurs d'autres variables.

Une fois le problème de conception exprimé sous la forme de contraintes, il est possible de le résoudre. Si différents solveurs ont été développés ces dernières années, tous opèrent en deux étapes :

- une étape de filtration, aussi rencontrée sous le terme de « propagation de contraintes », permettant de réduire les domaines de valeurs ;
- une recherche systématique et exhaustive, parmi les différentes affectations possibles de chacune des variables, des ensembles de valeurs de contraintes dans lesquelles toutes les combinaisons forment des solutions acceptables, satisfaisantes au sens des contraintes.

IV.1.2.2 Le choix d'un algorithme déterministe

La partie précédente présente brièvement certains algorithmes déterministes usuels employés dans la résolution de problèmes d'optimisation. Il est possible de différencier les algorithmes permettant la résolution de problèmes d'optimisation contraints de ceux qui ne le permettent pas. Les algorithmes de descente classiques ne font pas partie des

algorithmes envisageables du fait de la non prise en compte des contraintes. Dans ce travail, leur utilisation, intéressante du fait de leur simplicité d'implémentation, aurait entraîné la recherche de solutions dans des espaces contenant des individus ne satisfaisant pas les contraintes. Le problème de conception abordé dans ce manuscrit, du fait des contraintes définies dans le cahier des charges, impose donc le recours à un algorithme basé sur la satisfaction des contraintes du problème

Parmi les différents algorithmes d'optimisation traitant de problèmes contraints, les algorithmes de programmation par contraintes ont été retenus. Ce choix n'élimine pas qu'une autre méthode exacte, par exemple de type Branch and Bound, aurait pu être utilisée dans la mise en place de la stratégie de recherche hybride. Les algorithmes de programmation par contraintes ont été préférés du fait de leur efficacité reconnue dans la résolution des problèmes d'optimisation combinatoire [GIACCOBI, 2009]. Associés à des métaheuristiques, les techniques de retour en arrière (backtracking algorithm) utilisées dans la programmation par contraintes ont prouvé leur efficacités dans la mise en place de stratégies de recherches hybrides [AUTIN, 2006]. Cette démarche est par exemple rencontrée dans le travail de Barnier et al. [BARNIER, 1998] dans laquelle les auteurs utilisent dans leur étude un algorithme génétique pour parcourir l'espace de recherche lors de la résolution d'un problème d'optimisation combinatoire, appliqué au problème d'optimisation de tournées de véhicules. L'algorithme permet ainsi la division de l'espace global de recherche, les sous-domaines sélectionnés étant par la suite explorés à l'aide d'un algorithme de programmation par contraintes (figure IV-3).

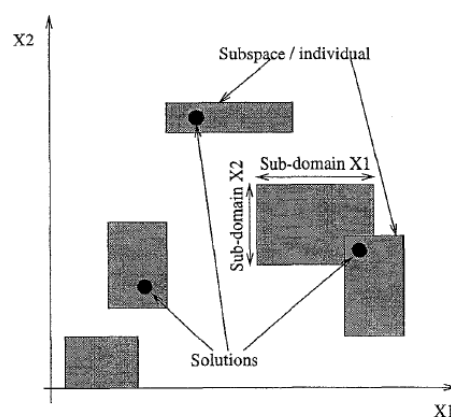


figure IV-3 : Exploration et subdivision de l'espace de recherche, d'après [BARNIER, 1998]

Le fonctionnement d'un algorithme de programmation par contraintes n'a été

présenté ici que de manière très générale. Le lecteur peut toutefois, s'il se souhaite, se diriger vers les travaux de Minoux [MINOUX, 1983] pour une compréhension plus approfondie.

L'objectif de ce chapitre est d'une part, de justifier d'une exploration locale autour d'individus envisagés lors de l'exécution de l'algorithme génétique et d'autre part, de proposer une démarche permettant de sélectionner les individus au voisinage desquels une cartographie de l'espace de recherche sera réalisée.

IV.1.3 Application de la stratégie d'hybridation

La stratégie d'hybridation va maintenant être appliquée, dans un premier temps, au problème de conception défini dans le cas d'étude préliminaire puis dans un second temps, en réponse au cahier des charges de l'application industrielle.

IV.1.3.1 Application au cas d'étude préliminaire

L'objectif est ici d'utiliser des individus envisagés comme solution lors de l'exploration globale effectuée par l'AG comme points de départ de recherches locales. L'exploitation du calcul utilisé dans le chapitre précédent pour la validation de l'algorithme génétique appliqué au cas d'étude préliminaire est maintenant reprise pour la validation de la stratégie d'hybridation.

Sans distinction sur leur population d'appartenance, les meilleurs individus explorés lors du calcul effectué à chaque génération sont représentés figure IV-4.

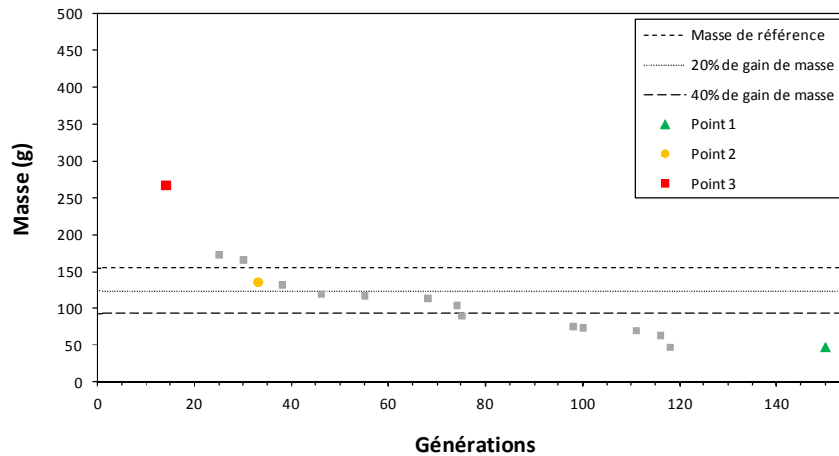


figure IV-4 : Masse des meilleurs individus identifiées à chaque génération au cours du calcul

Une recherche locale va être à présent effectuée autour de trois points distincts (figure IV-4) dont le détail des compositions architecture/matériaux ainsi que de leurs masses respectives sont détaillées tableau IV-1 :

- point 1 : individu optimal proposé à l'issue du calcul génétique par les deux populations. Cet individu, solution au problème de conception, propose un gain supérieur à 40% de la masse de référence ;
- point 2 : individu proposé à la 33^{ème} génération. Cet individu, respecte l'ensemble des astreintes du CdC (hors astreinte de masse) car il ne permet pas d'atteindre un gain de masse d'au moins 20% mais présente une masse plus faible que la masse de référence. Cet individu n'est cependant pas solution au problème de conception ;
- point 3 : individu exploré à la 14^{ème} génération. Cet individu satisfait l'ensemble des astreintes (hors astreinte de masse), sa masse est cette fois supérieure à la masse de référence.

Les points 2 et 3 peuvent permettre la proposition de solutions diversifiées car leur satisfaction vis-à-vis des astreintes du CdC est suffisante (hors astreinte de masse) pour envisager leur optimisation.

| | Couche supérieure | | Couche inférieure | | Masse (g) |
|----------------|-------------------|----------------------|----------------------------------|--|-----------|
| | Motif géométrique | Matériau | Motif géométrique | Matériaux (renfort/matrice) | |
| Point 1 | Picots étagés | alliage de magnésium | Composite UD | Carbone UHM/alliage d'aluminium | 48 |
| Point 2 | Picots étagés | alliage de magnésium | Composite tissé | BorSic/ alliage d'aluminium | 136 |
| Point 3 | Picots étagés | alliage de magnésium | Composite Fibres courtes alignés | Carbure de silicium/ alliage d'aluminium | 268 |

tableau IV-1 : Compositions architecture/matériaux et masses des individus exploités dans la recherche locale

Par la suite, on appellera candidat un individu présentant une masse inférieure à la masse de référence et satisfaisant l'ensemble des contraintes du cahier des charges (hors contrainte de masse).

Effectuer une recherche locale autour des trois individus précédents consiste à faire évoluer les paramètres physiques et géométriques qui définissent un couple architecture/matériaux, ce qui signifie que les motifs des couches et leurs constituants sont donc figés.

i. Point 1 : Validation de la solution optimale proposée

Le premier individu étudié est donc la solution optimale proposée par l'algorithme génétique. S'il est impossible de la qualifier vis-à-vis de l'optimum global du problème, la recherche locale autour de cette solution effectuée avec la programmation par contraintes va permettre de la positionner dans l'espace local de recherche. Cependant, avant cela, il est important de valider l'exhaustivité des solutions obtenues à l'aide de la programmation par contraintes. Pour cela, un balayage complet des paramètres physiques et géométriques à partir du couple architecture/matériaux du point 1, c'est-à-dire un balayage complet de l'espace local autour du point 1, est effectué. Les résultats de ce balayage sont présentés figure IV-5.

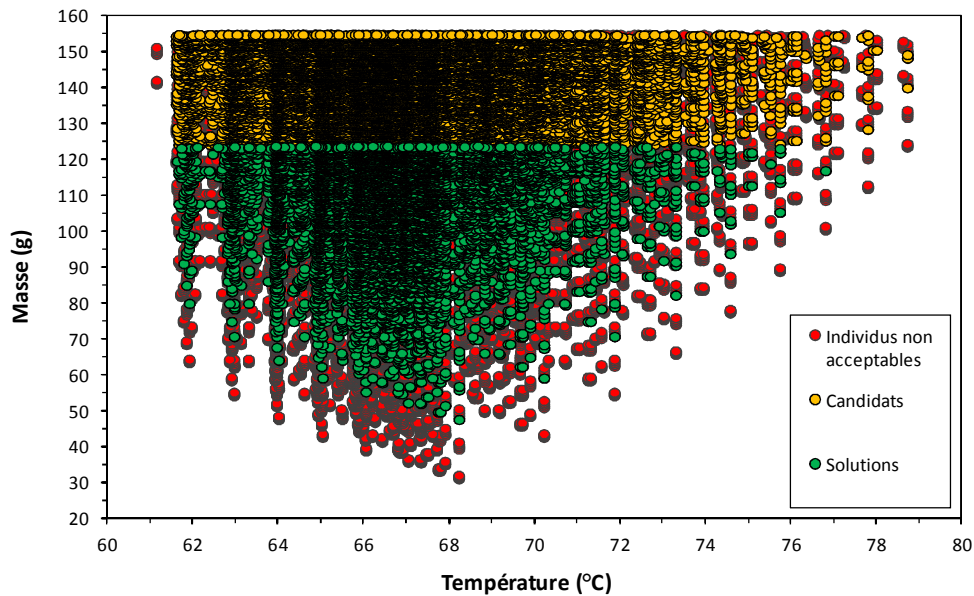


figure IV-5 : Masse des individus en fonction de la température de la face interne. Balayage local de l'espace de recherche autour du point 1, les marqueurs rouges représentent les individus non acceptables, les marqueurs oranges les candidats et les marqueurs verts représentent les solutions au problème de conception

L'espace local de recherche est constitué de 1 176 008 combinaisons. Sur ce graphique, ne sont représentées que les combinaisons proposant une masse inférieure ou égale à la masse de référence ($m_{\text{référence}}=155\text{g}$), soit 247 395 combinaisons. A partir de celles-ci, une étape de filtration a permis d'identifier :

- les individus non acceptables (182571) : ces individus ne satisfont pas une ou plusieurs contraintes du CdC (hors contrainte de masse) ;
- les candidats (45190) : ces individus satisfont l'ensemble des contraintes du CdC sauf l'contrainte de masse car ils ne permettent pas un gain de masse d'au moins 20% ;
- les solutions au problème de conception (19634).

Les résultats de ce balayage illustrent la taille déjà conséquente de l'espace de recherche même lorsque celui-ci est réduit du fait d'un choix fixé du couple architecture/matériaux. De plus, la filtration nécessaire à la différenciation des combinaisons acceptables de celles qui ne le sont pas confirme la pertinence de l'utilisation

d'un outil permettant une exploration locale dans un espace de recherche filtré.

A présent, une exploration locale autour du point 1 est menée à l'aide d'un algorithme de programmation par contraintes. Les résultats de cette exploration, comparés aux combinaisons acceptables (solutions + candidats) obtenues lors du balayage précédent, sont présentés figure IV-6.

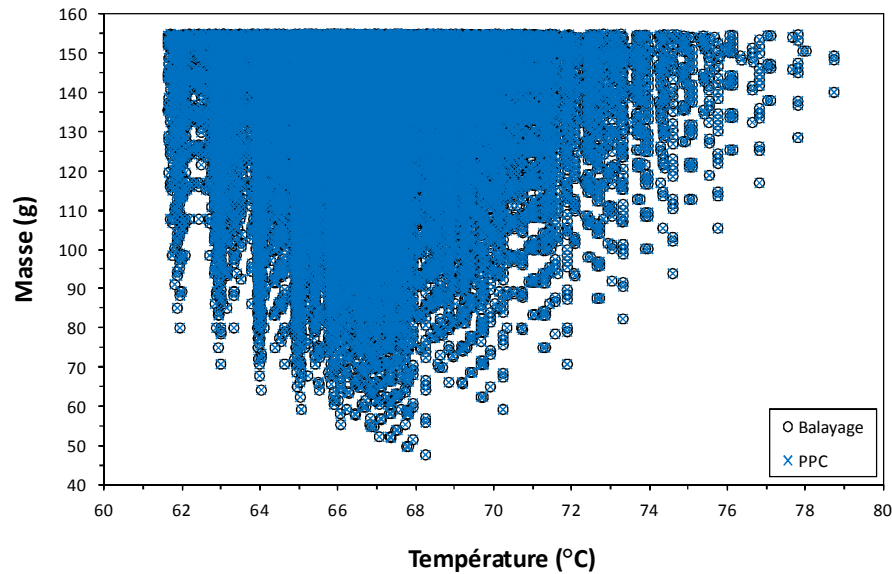


figure IV-6 : Masse des individus en fonction de la température de la face interne. Comparaison des combinaisons acceptables du balayage avec les résultats proposés par la PPC

Cette figure montre une parfaite coïncidence entre les résultats proposés par la programmation par contraintes et les combinaisons acceptables identifiées par le balayage. 64824 individus possèdent une masse inférieure ou égale à la masse de référence et satisfont l'ensemble des astreintes du CdC (astreinte de masse comprise ou non, soit solutions + candidats). Ce résultat valide que l'algorithme de programmation par contrainte effectue une exploration locale exhaustive dans un espace de recherche constitué des individus satisfaisant l'ensemble des astreintes du CdC.

Enfin, il est maintenant intéressant de situer la solution optimale proposée par l'algorithme génétique dans cet espace local de recherche (figure IV-7).

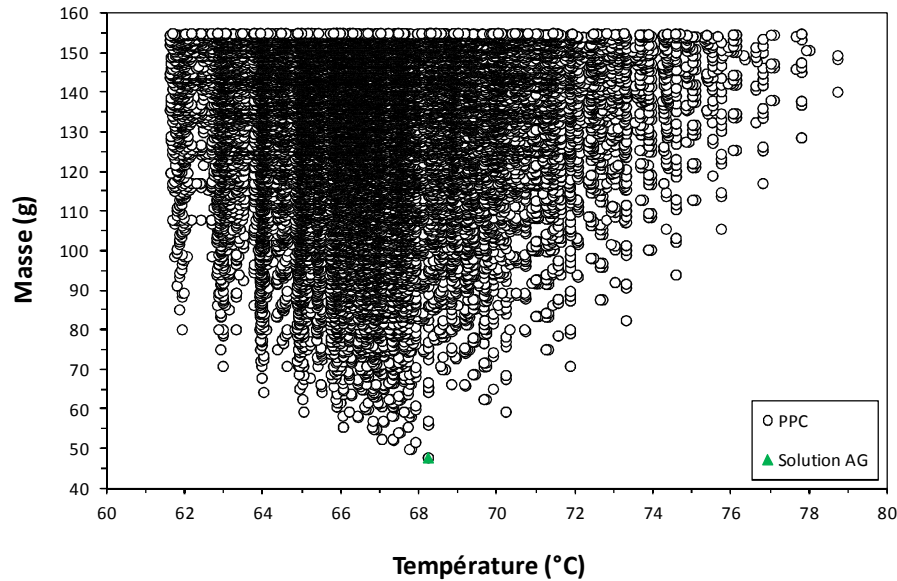


figure IV-7 : Masse des individus en fonction de la température de la face interne. Qualification de la solution optimale proposée par l'algorithme génétique

Il est possible de constater que la solution proposée par l'algorithme génétique est confondue avec l'optimum de l'espace local. Pour le même couple architecture/matériaux, que celui proposé par l'algorithme génétique à la fin de sa convergence, il n'existe donc pas de jeux de paramètres physiques et géométriques permettant une diminution de la masse tout en assurant la satisfaction des astreintes du CdC.

ii. Point 2 : Optimisation d'un candidat exploré ($m \leq m_{référence}$)

Cet individu est défini comme un candidat au problème traité dans ce travail, possédant une masse inférieure à la masse de référence. Affichant une masse de 136g, ce candidat ne permet un gain de masse que de 11,8%. L'exploration de l'espace local autour de cette solution, dont les résultats sont présentés figure IV-8, permet de positionner cette solution vis-à-vis de son optimum local.

Si l'individu proposé par l'algorithme génétique permet un gain de masse par rapport à la solution de référence, la figure IV-8 montre qu'il n'est pas optimal. En effet, l'exploration de l'espace met en évidence un optimum local proposant une masse plus faible de près de 57g. Il existe donc, pour le couple architecture/matériaux identifié au point 2, un jeu de paramètres physiques et géométriques permettant une réduction de masse de l'individu.

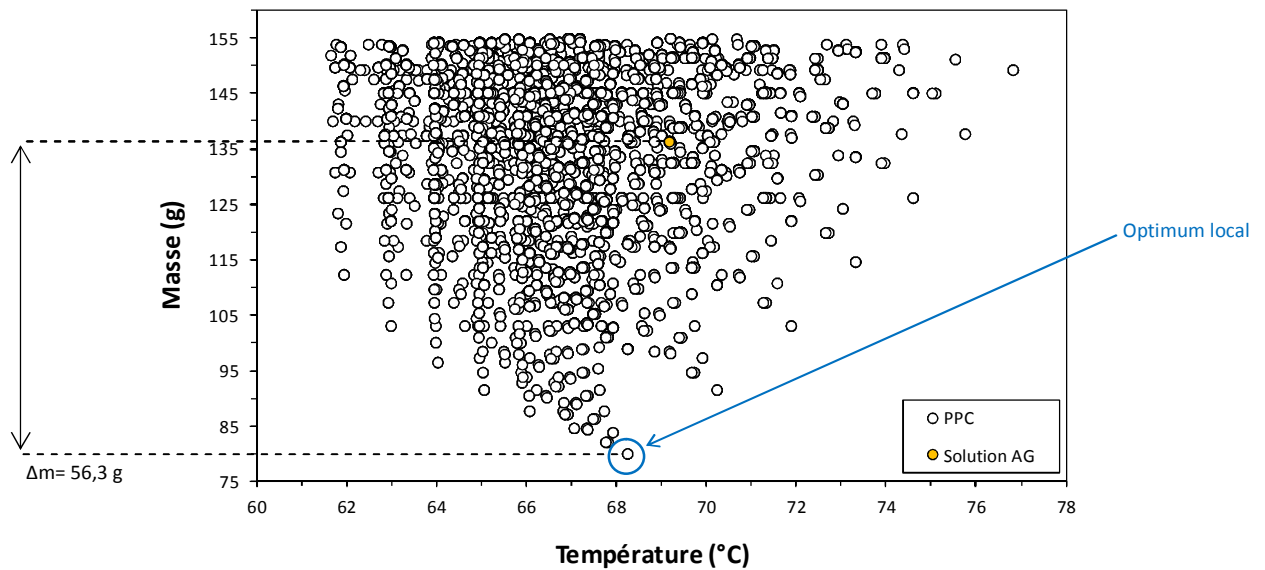


figure IV-8 : Masse des individus en fonction de la température de la face interne. Exploration de l'espace local de recherche autour du point 2

Cette solution est composée sur la couche supérieure de picots étagés en alliage de magnésium tandis que la couche inférieure est un composite à matrice aluminium renforcée par des fibres tissées BorSic. Le motif géométrique picot dépend de 4 paramètres géométriques :

- D_{picot} : diamètre des picots, ($2 \text{ mm} \leq D_{\text{picot}} \leq 10 \text{ mm}$) ;
- Δl : facteur sans dimension, $\Delta l = S_l/D_{\text{picot}}$, S_L étant l'espacement des picots dans la direction du flux d'air, ($1,25 \leq \Delta l \leq 3$) ;
- Δt : facteur sans dimension, $\Delta t = S_t/D_{\text{picot}}$, S_T étant l'espacement des picots dans la direction perpendiculaire au flux d'air, ($1,25 \leq \Delta t \leq 3$) ;
- γ : facteur de forme du picot, sans dimension = $H_{\text{picot}}/D_{\text{picot}}$, ($3 \leq \gamma \leq 8$) ;

Le motif géométrique composite à renfort tissé dépend de 3 paramètres physiques et géométriques :

- v_f : fraction volumique de renfort, ($0,2 \leq v_f \leq 0,6$) ;
- ϑ : orientation de la couche par rapport au repère du multimatériau ($0^\circ \leq \vartheta \leq 90^\circ$) ;

- e_{couche} : épaisseur de la couche, ($250 \mu\text{m} \leq e_{\text{couche}} \leq 2500 \mu\text{m}$).

A présent, il est intéressant d'observer les différences de paramètres physiques et géométriques entre le candidat proposé par l'algorithme génétique et l'optimum local identifié à l'aide de la programmation par contraintes (figure IV-9).

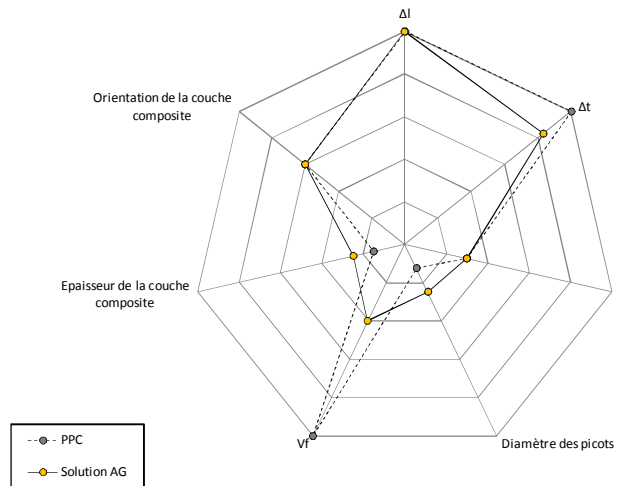


figure IV-9 : Paramètres physiques et géométriques du multimatériau obtenu par algorithme génétique et du multimatériau obtenu par optimisation sous contraintes

Sur les 7 paramètres d'optimisation qui caractérisent le multimatériau, quatre diffèrent (tableau IV-2). La solution identifiée par la programmation par contraintes est optimisée vis-à-vis du candidat proposé par l'algorithme génétique grâce à l'optimisation de paramètres intervenant dans chacune des couches du multimatériau : une diminution de l'épaisseur de la couche inférieure composite ainsi que l'augmentation de son taux volumique de renfort permet un plus juste dimensionnement tandis qu'une augmentation de l'espacement des picots dans le sens transverse au flux et une diminution de leur diamètre permet une réduction de la masse du multimatériau tout en assurant la fonction de dissipation thermique.

| | D_{picot} (mm) | Δl | Δt | γ | v_f | Θ (°) | e_{couche} (mm) |
|-----------------------------|----------------------------|------------|------------|----------|-------|--------------|-----------------------------|
| Paramètres avant PPC | 3 | 3 | 2,5 | 2 | 0,2 | 0 | 1,25 |
| Paramètres après PPC | 3 | 3 | 3 | 2 | 0,5 | 0 | 0,75 |

tableau IV-2 : Valeurs des paramètres géométriques optimisés obtenu à partir de la programmation par contraintes

iii. Point 3 : Optimisation d'un candidat exploré ($m \geq m_{\text{référence}}$)

L'individu considéré est un candidat possédant une masse cette fois-ci supérieure à la masse de référence. Ce candidat est un multicouche constitué sur la couche supérieure de picots étagés en alliage de magnésium tandis que la couche inférieure est un composite à matrice aluminium renforcée par des fibres courtes alignées en carbure de silicium. Ce multimatériau, caractérisé par 8 paramètres (Δl , Δt , γ , D_{picots} , v_f , L/D , ϑ , $e_{\text{composite}}$), présente une masse de 268g. La figure IV-10 présente l'espace local de recherche autour du candidat et permet l'identification de l'optimum local associé.

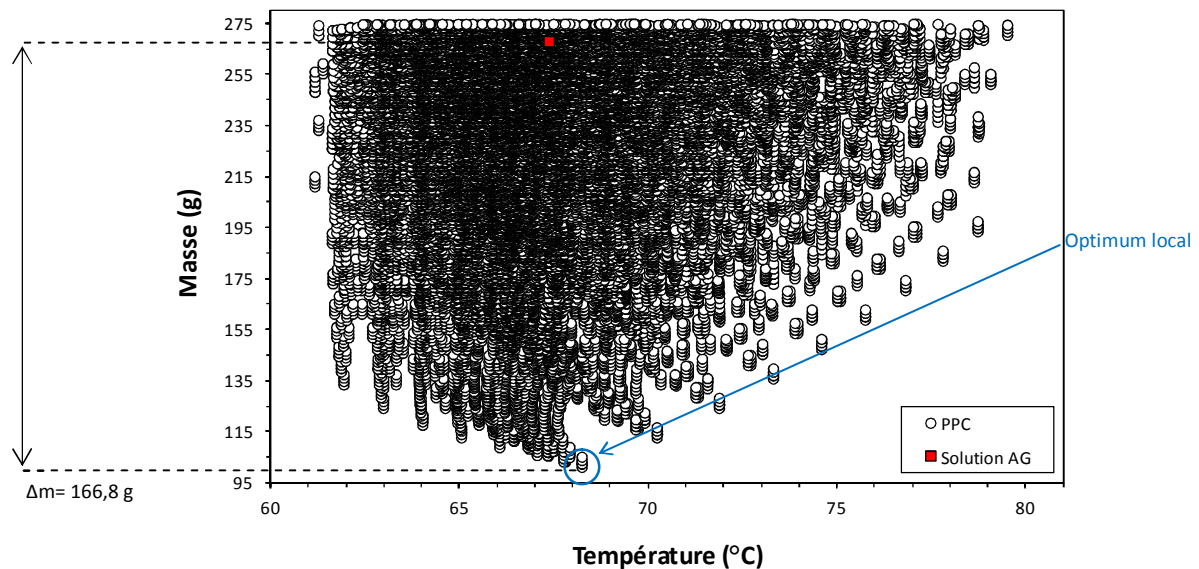


figure IV-10 : Masse des individus en fonction de la température de la face interne. Identification d'une solution à partir d'une exploration de l'espace local au point 3

A partir d'une optimisation des paramètres géométriques (figure IV-11)

intervenant dans l'ensemble des couches du multimatériau (augmentation de l'espace entre les picots dans le sens transversal, diminution du facteur de forme des picots et du facteur de forme des fibres courtes et diminution de la couche composite), la programmation par contraintes a permis de proposer une solution permettant une réduction de masse de 42,1% par rapport au candidat de départ et un gain de masse de 34,7% par rapport à la solution de référence.

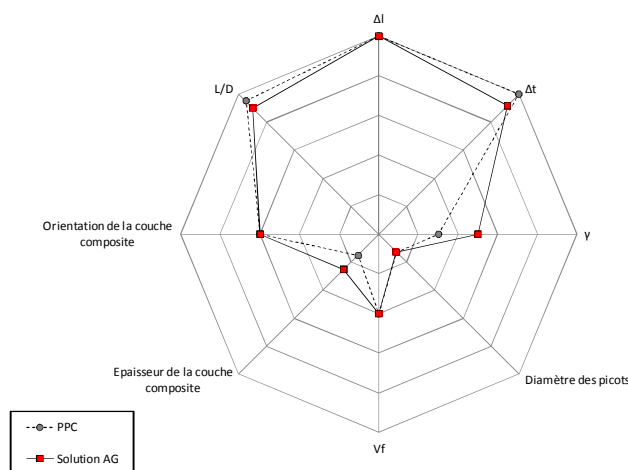


figure IV-11 : Paramètres physiques et géométriques du multimatériau obtenus par algorithme génétique et du multimatériau obtenu par optimisation sous contraintes

Les valeurs de chacun de ces paramètres sont présentées dans le tableau IV-3.

| | D_{picot} (mm) | Δl | Δt | γ | v_f | θ (°) | e_{couche} (mm) | L/D |
|-----------------------------|-------------------------|------------|------------|----------|-------|--------------|--------------------------|-----|
| Paramètres avant PPC | 4 | 3 | 2,75 | 2 | 0,2 | 0 | 3 | 92 |
| Paramètres après PPC | 3 | 3 | 3 | 2 | 0,2 | 0 | 1 | 97 |

tableau IV-3 : Valeurs des paramètres géométriques optimisés obtenues à partir de la programmation par contraintes

iv. Bilan

Les résultats précédents montrent que plus l'exploration locale est appliquée tôt dans la convergence de l'AG, moins l'optimum local est proche de l'individu de départ donc plus l'optimisation de l'individu grâce à la programmation sous contraintes est efficace (figure IV-12).

Via une optimisation des paramètres physiques et géométriques de l'individu, la programmation par contraintes peut permettre la proposition de solutions optimisées vis-à-vis des astreintes et de l'objectif du cahier des charges (tableau IV-4).

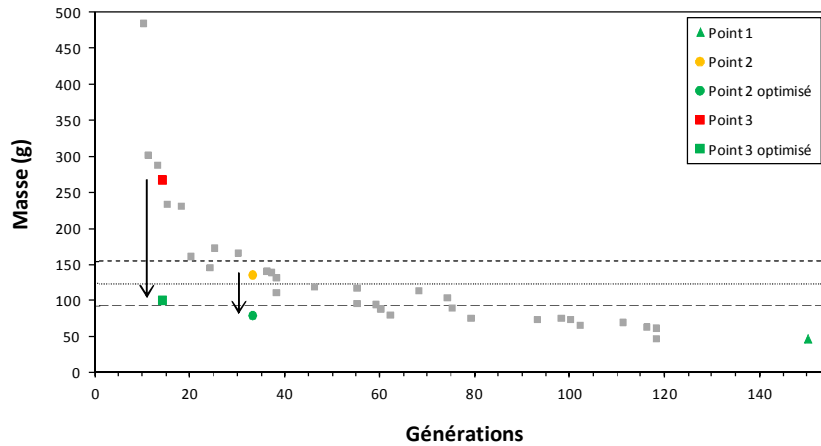


figure IV-12 : Masse des meilleurs individus identifiées à chaque génération au cours du calcul par l'AG + optimisation des individus sélectionnés par PPC

Il est intéressant de noter que la masse de l'individu optimal identifié à l'issue de la convergence de l'algorithme génétique est inférieure aux masses des optimums locaux identifiés à l'aide de la programmation par contraintes.

| | Situation | Masse avant PPC (g) | Masse après PPC (g) | Gain de masse/solution de départ (%) | Gain de masse/masse référence (%) |
|----------------|---------------|---------------------|---------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|
| Point 1 | optimum local | 48 | 48 | 0 | 69 |
| Point 2 | Candidat | 136 | 80 | 41 | 48 |
| Point 3 | Candidat | 268 | 101 | 62 | 35 |

tableau IV-4 : Masse des individus avant et après l'exploitation de l'espace local de recherche

Il n'est pas possible d'affirmer que l'optimum global du problème a été identifié par l'algorithme génétique, cette exploration hybride permet toutefois de démontrer la qualité de la solution proposée par l'AG vis-à-vis d'autres optimum locaux de l'espace de recherche.

IV.1.3.2 Application au cas d'étude industriel

La stratégie d'exploration hybride va à présent être appliquée à la résolution du

cas d'étude industriel. L'exploitation du calcul utilisé dans le chapitre précédent pour la validation de l'algorithme génétique est reprise.

Pour rappel, les deux populations ne convergent pas vers le même individu, c'est-à-dire qu'elles ne convergent pas vers le même couple architecture/matériaux. Si les multimatériaux de chacune des deux populations possèdent le même couple motif géométrique/matériaux sur leur couche supérieure (picots étagés en alliage de magnésium), la solution de la population 1 ($m_1=75g$) est composée d'une couche composite sur la couche inférieure tandis que la solution optimale de la population 2 ($m_2=99g$) est composée elle d'une couche monolithique. Sans distinction sur leur population d'appartenance, les meilleurs individus de chaque génération explorés lors du calcul effectué sont représentés figure IV-13.

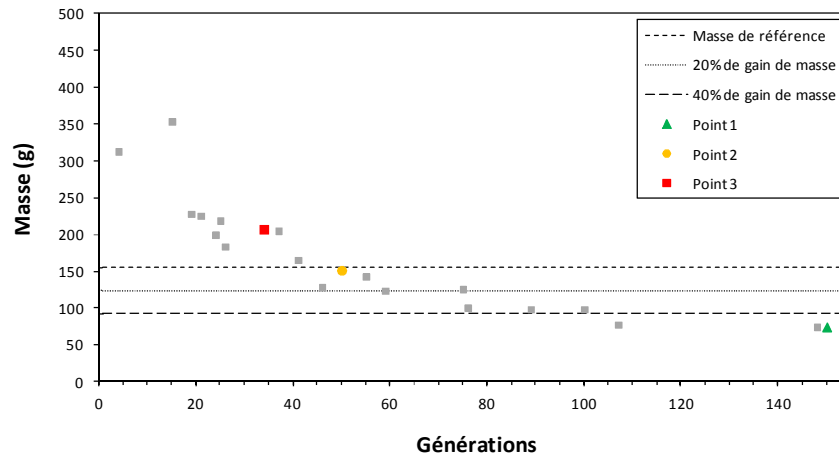


figure IV-13 : Masse des meilleurs individus identifiées à chaque génération au cours du calcul

Une recherche locale va être à présent effectuée autour de trois points distincts (figure IV-13) dont le détail des compositions architecture/matériaux ainsi que leurs masses respectives sont détaillées tableau IV-5 :

- point 1 : individu optimal proposé à l'issu du calcul génétique par la population 1 (solution optimale) ;
- point 2 : individu proposé à la 50^{ème} génération. Cet individu, respecte l'ensemble des contraintes du CdC (hors contrainte de masse) et présente une masse plus faible que la masse de référence. Ce candidat propose la même architecture et les mêmes matériaux que la solution optimale identifiée par

la population 2 ;

- point 3 : individu exploré à la 34^{ème} génération. Cet individu satisfait l'ensemble des contraintes (hors contrainte de masse) et sa masse est cette fois supérieure à la masse de référence.

| | Couche supérieure | | Couche inférieure | | Masse (g) |
|----------------|-------------------|----------------------|-------------------|----------------------------------|-----------|
| | Motif géométrique | Matériau | Motif géométrique | Matériaux (renfort/matrice) | |
| Point 1 | Picots étagés | alliage de magnésium | Composite tissé | Carbone UHM/alliage de magnésium | 75 |
| Point 2 | Picots étagés | alliage de magnésium | Monolithique | Alliage de magnésium | 151 |
| Point 3 | Picots étagés | alliage de magnésium | Composite UD | Carbone UHM/alliage de magnésium | 207 |

tableau IV-5 : Compositions architecture/matériaux et masses des individus exploités dans la recherche locale

Les points 2 et 3 ont là aussi été spécifiquement choisis comme points de départ d'explorations locales car ils peuvent permettre la proposition de solutions architecturées différentes du point 1. De plus, chacun de ces individus satisfait largement les contraintes du CdC (hors contrainte de masse) laissant ainsi envisager qu'il est possible d'optimiser leurs paramètres de manière à obtenir des solutions toujours plus légères.

Pour respecter des temps de calculs raisonnables, les pas de variations de chaque paramètre concerné ont été légèrement augmentés sans changer les bornes de leur plage de variation.

i. Point 1 : Validation de la solution optimale proposée

L'individu étudié est ici la solution optimale proposée par l'algorithme génétique. L'exploration locale autour de cette solution est présentée figure IV-14.

Cet espace local de recherche est composé de 73 individus ayant une masse inférieure ou égale à la masse de référence dont 62 solutions (satisfaisant l'astreinte de masse fixée à 20% de gain de masse) et 24 permettent un gain de masse supérieur à 40%. La figure IV-14 démontre que la solution optimale proposée par l'algorithme génétique est confondue avec celle de l'espace local de recherche.

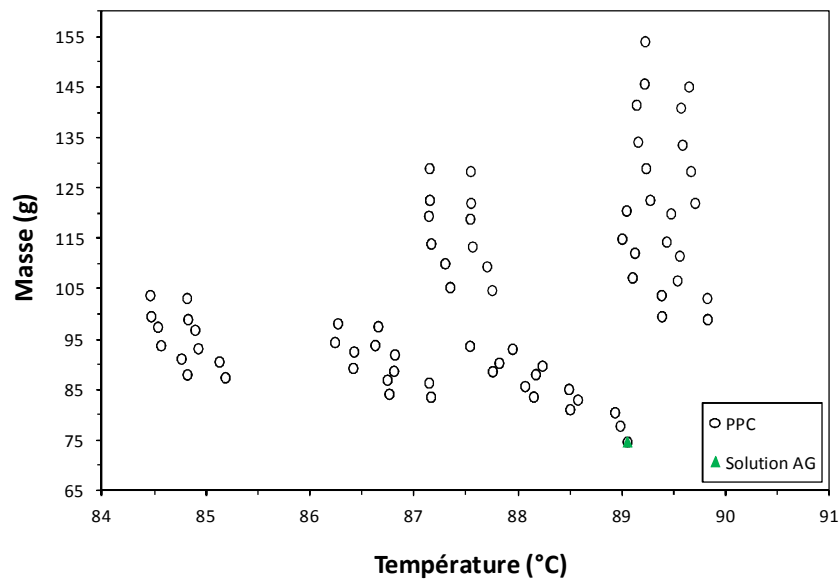


figure IV-14 : Masse des meilleurs individus identifiées à chaque génération au cours du calcul.
Qualification de la solution optimale proposée par l’algorithme génétique

ii. Point 2 : Optimisation d’un candidat exploré ($m \leq m_{référence}$)

Ce multimatériau, composé du même couple architecture/matériaux que la solution optimale de la population 2, affiche une masse de 151g ne proposant ainsi qu’un gain de masse inférieur à 3%. L’exploration locale autour de ce point 2 est présentée figure IV-15. Cet espace local de recherche est composé de 120 individus : 47 sont solutions (à partir de 20% de gain de masse) et 73 sont candidats (entre 0 et 20% de gain de masse). L’espace local de recherche a été limité aux individus proposant des masses inférieures à la masse de référence).

L’individu proposé par l’algorithme génétique, point de départ de cette recherche locale, permet un gain de masse par rapport à la solution de référence mais la figure IV-15 montre qu’il n’est pas optimal. En effet, l’exploration de l’espace identifie un optimum local proposant une masse de 99g soit près de 53g plus léger par rapport au candidat de départ.

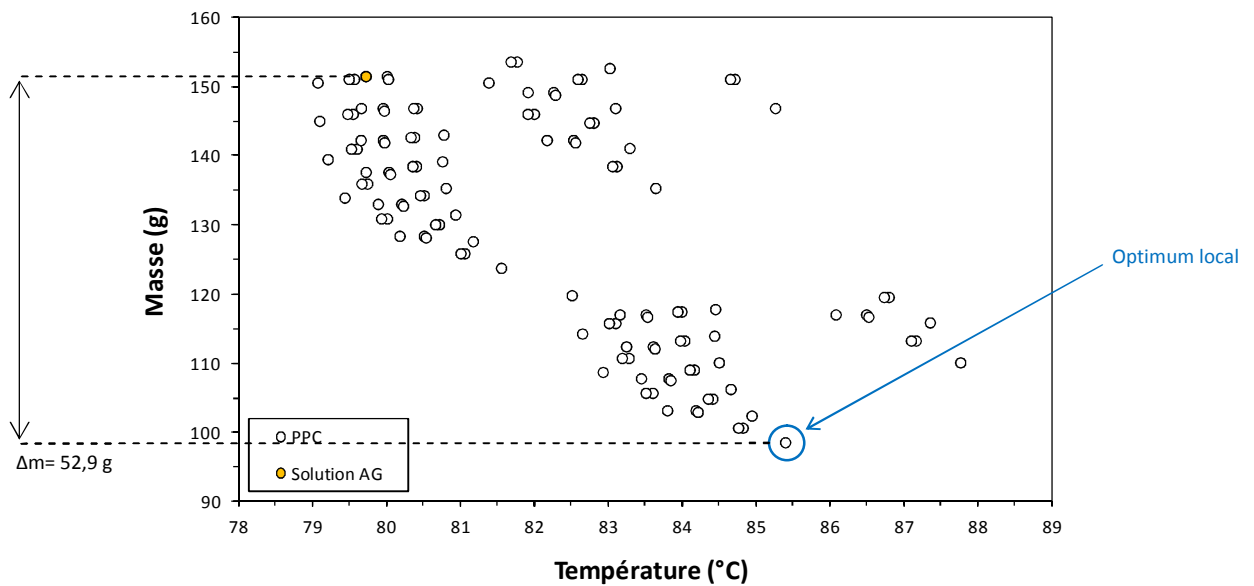


figure IV-15 : Masse des meilleurs individus identifiées à chaque génération au cours du calcul.
Qualification de la solution au point 2 à partir d'une exploration de l'espace local

Cette solution est composée sur la couche supérieure de picots étagés en alliage de magnésium tandis que la couche inférieure est une couche monolithique en alliage de magnésium. La figure IV-16 permet de comparer les paramètres géométriques de la solution de départ et de l'optimum local de l'espace de recherche. L'algorithme de programmation par contraintes a été en mesure de proposer une optimisation des paramètres géométriques de chacune des couches du multimatériau : l'espacement des picots dans la direction transverse au flux d'air ainsi que leur hauteur et l'épaisseur de la couche monolithique inférieure.

Cette exploration locale est d'autant plus intéressante qu'elle démontre aussi que la solution optimale proposée par la population 2 et cet optimum local sont confondus. En effet, l'individu sélectionné au point 2 à la 50^{ème} génération n'est pas optimisé et cet individu présente le même couple architecture/matériaux que la solution optimale proposée par la population 2. La programmation par contraintes démontre à nouveau que la solution optimale identifiée par la population 2 est également un optimum local de l'espace de recherche. Ainsi, les solutions optimales de chacune des deux populations de l'AG représentent un optimum local de l'espace global de recherche.

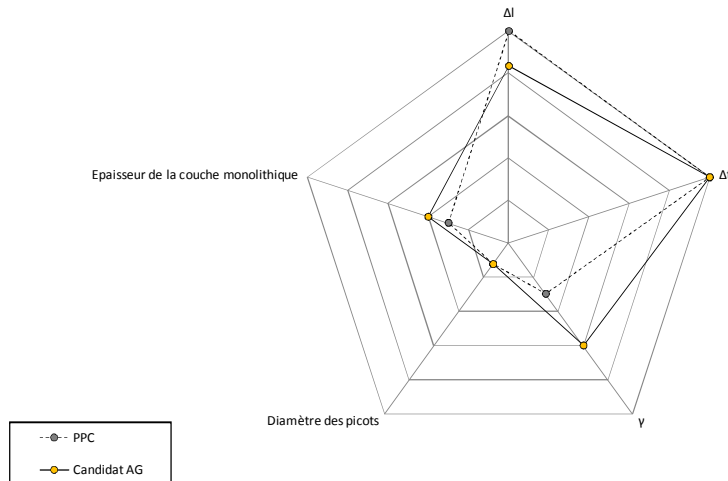


figure IV-16 : Paramètres physiques et géométriques du multimatériau obtenu par algorithme génétique et du multimatériau obtenu par optimisation sous contraintes

L'ensemble des paramètres géométriques de ces deux individus avant et après la programmation par contraintes sont présentés dans le tableau IV-6.

| | D_{picot} (mm) | Δl | Δt | γ | e_{couche} (mm) |
|-----------------------------|-------------------------|------------|------------|----------|--------------------------|
| Paramètres avant PPC | 2 | 2,5 | 3 | 5,5 | 2 |
| Paramètres après PPC | 2 | 3 | 3 | 3 | 1,5 |

tableau IV-6 : Valeurs des paramètres géométriques optimisés obtenu à partir de la programmation par contraintes

iii. Point 3 : Optimisation d'un candidat exploré ($m \geq m_{\text{référence}}$)

Ce candidat, point 3 de départ de l'exploration locale, propose une masse de 207g. Cette exploitation de l'espace local de recherche est présentée figure IV-17. Celui-ci est composé de 2585 individus : 270 sont solutions (dont 10 proposent un gain de masse supérieur à 40%) et 2315 sont candidats (l'espace local de recherche a été limité aux individus proposant des masses inférieures à 220g). Le point de départ de cette exploration locale ne répond pas au cahier des charges puisqu'il ne conduit à pas à une diminution de la masse (le candidat présente une masse de 207g).

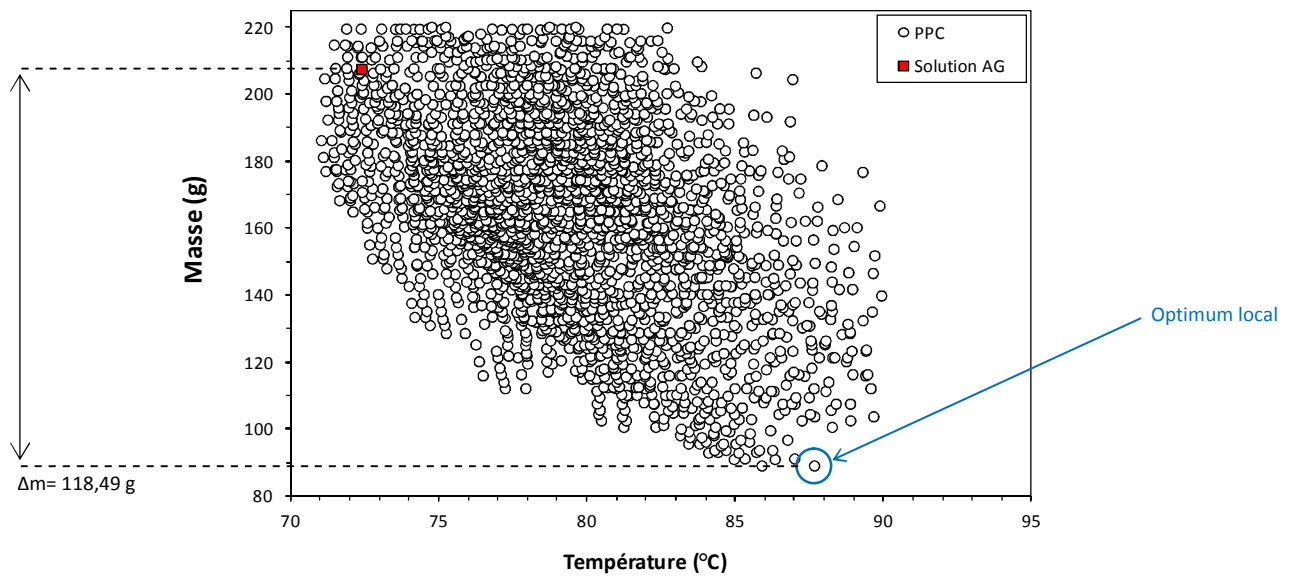


figure IV-17 : Masse des meilleurs individus identifiées à chaque génération au cours du calcul.
 Identification d'une solution à partir d'une exploration de l'espace local au point 3

L'exploitation de l'espace local identifie un optimum local et permet de proposer une solution ayant une masse de 89g.

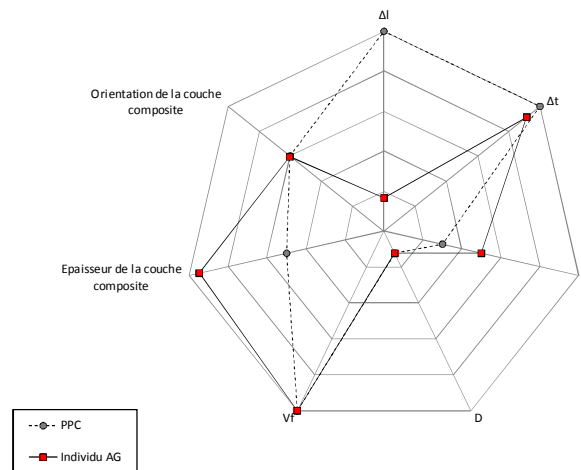


figure IV-18 : Comparaison des paramètres physiques et géométriques du candidat et de l'optimum associé à son espace local de recherche

L'individu est composé sur la couche supérieure de picots étagés en alliage de magnésium tandis que la couche inférieure est une couche composite à matrice aluminium renforcée par des fibres continues de carbone UHM. La figure IV-18 compare les paramètres géométriques de la solution de départ et de l'optimum local de l'espace de recherche dont un récapitulatif des valeurs est proposé tableau IV-7. L'optimisation du

candidat de départ a été possible grâce à l'optimisation de l'espacement des picots dans les directions longitudinale et transverse au flux d'air, leur hauteur ainsi que grâce à une optimisation de l'épaisseur de la couche composite.

| | D_{picot} (mm) | Δl | Δt | γ | v_f | Θ (°) | e_{couche} (mm) |
|-----------------------------|----------------------------|------------|------------|----------|-------|--------------|-----------------------------|
| Paramètres avant PPC | 2 | 1,5 | 2,75 | 5 | 0,5 | 90 | 1,875 |
| Paramètres après PPC | 2 | 3 | 3 | 3 | 0,5 | 90 | 1 |

tableau IV-7 : Valeurs des paramètres géométriques optimisés obtenu à partir de la programmation par contraintes

iv. Bilan

A l'image des résultats obtenus dans le cas de la résolution du cas d'étude préliminaire, les résultats précédents montrent l'intérêt de l'hybridation de l'AG avec un algorithme de programmation par contraintes (figure IV-19).

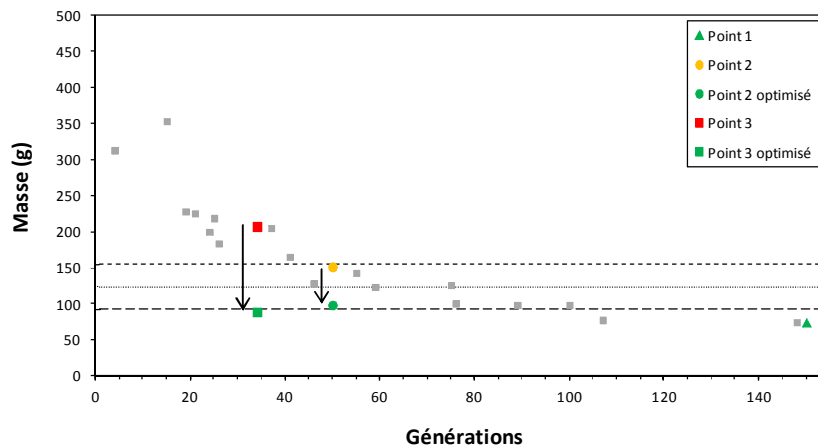


figure IV-19 : Masse des meilleurs individus identifiées à chaque génération au cours du calcul par l'AG + optimisation des individus sélectionnés par PPC

Les détails des individus exploités dans le cadre de cette stratégie d'exploration hybride sont récapitulés dans le tableau IV-8.

| | Masse avant PPC (g) | Masse après PPC (g) | Gain de masse/solution de départ (%) | Gain de masse/masse référence (%) |
|----------------|------------------------|------------------------|--|---|
| Point 1 | 75 | 75 | 0 | 52 |
| Point 2 | 151 | 99 | 35 | 34 |
| Point 3 | 207 | 89 | 57 | 43 |

tableau IV-8 : Récapitulatif des masses obtenues de chacun des individus sur laquelle une exploration locale a été menée

IV.2 Démarche d'exploitation de l'espace de recherche

Le travail présenté jusqu'à maintenant a permis de justifier l'utilisation de deux outils de sélection/optimisation, chacun jouant un rôle distinct dans la proposition de solutions :

- un algorithme génétique pour une exploration globale de l'espace des solutions dont la taille ne permet pas d'envisager un balayage ;
- un algorithme de programmation par contraintes pour une exploration locale de l'espace de recherche permettant sa cartographie locale.

La force d'une méthode de conception réside entre autre dans sa capacité à proposer des solutions variées, des solutions pouvant adopter des choix différents d'architecture ou de constituants. Ainsi, la fin de cette partie va être consacrée à la définition et à la validation d'une démarche permettant une plus large exploitation de l'espace de recherche.

IV.2.1 La démarche proposée

Le recours à une exploration globale associée à une exploration locale permet d'élargir dans un premier temps le périmètre de recherche dans un espace extrêmement vaste. Cette association devient d'autant plus efficace si elle est utilisée comme brique d'une démarche d'exploitation itérative de l'espace de recherche.

IV.2.1.1 Principe de la démarche

Les solutions exploitées jusqu'à présent sont extraites des individus les plus performants de chaque génération. Leur choix dépend donc de la nature des individus contenus dans chaque population au cours de l'exécution de l'AG, ce qui leur confère un caractère aléatoire. La démarche proposée s'appuie sur une exploitation itérative de l'espace de recherche, chaque itération étant axée autour de 3 étapes :

- étape 1 : évolution de l'algorithme génétique dans l'espace global de recherche jusqu'à une solution (figure IV-20a) ;
- étape 2 : exploration locale exhaustive de l'espace de recherche à l'aide de l'algorithme de programmation par contraintes autour des solutions et des candidats identifiés par l'algorithme génétique (figure IV-20b) ;
- étape 3 : diminution de l'espace de recherche (figure IV-20c). Basée sur les exigences du concepteur ou sur des critères de choix, cette diminution de l'espace de recherche consiste à supprimer de manière ciblée des solutions identifiées.

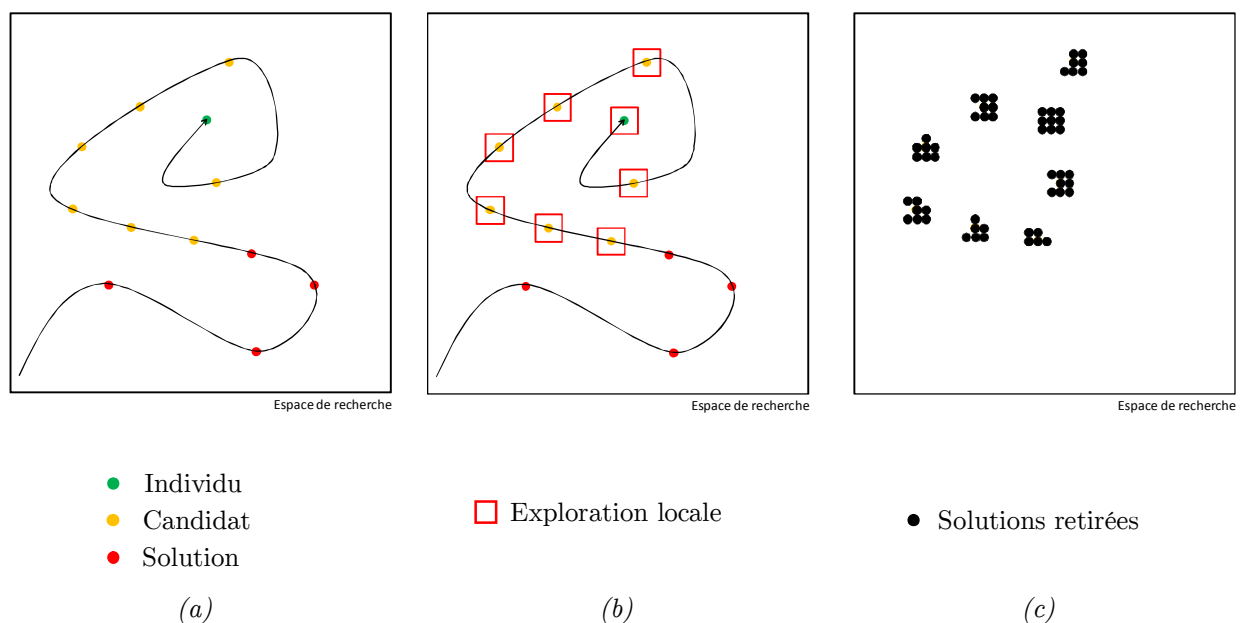


figure IV-20 : Représentation schématique de la première itération de la démarche

A une itération quelconque de la démarche, des solutions ont été identifiées et, à partir de critères de choix, certaines d'entre elles ont été supprimées de l'espace de

recherche. L'objectif est alors de relancer l'algorithme génétique (figure IV-21a) le forçant ainsi à emprunter un chemin différent dans l'espace de recherche. Une exploration exhaustive locale pourra permettre l'identification de nouvelles solutions (figure IV-21b). Si le concepteur souhaite se voir proposer d'autres solutions, il pourra à nouveau supprimer certaines d'entre elles de l'espace de recherche (figure IV-21c) avant de relancer la démarche d'exploration.

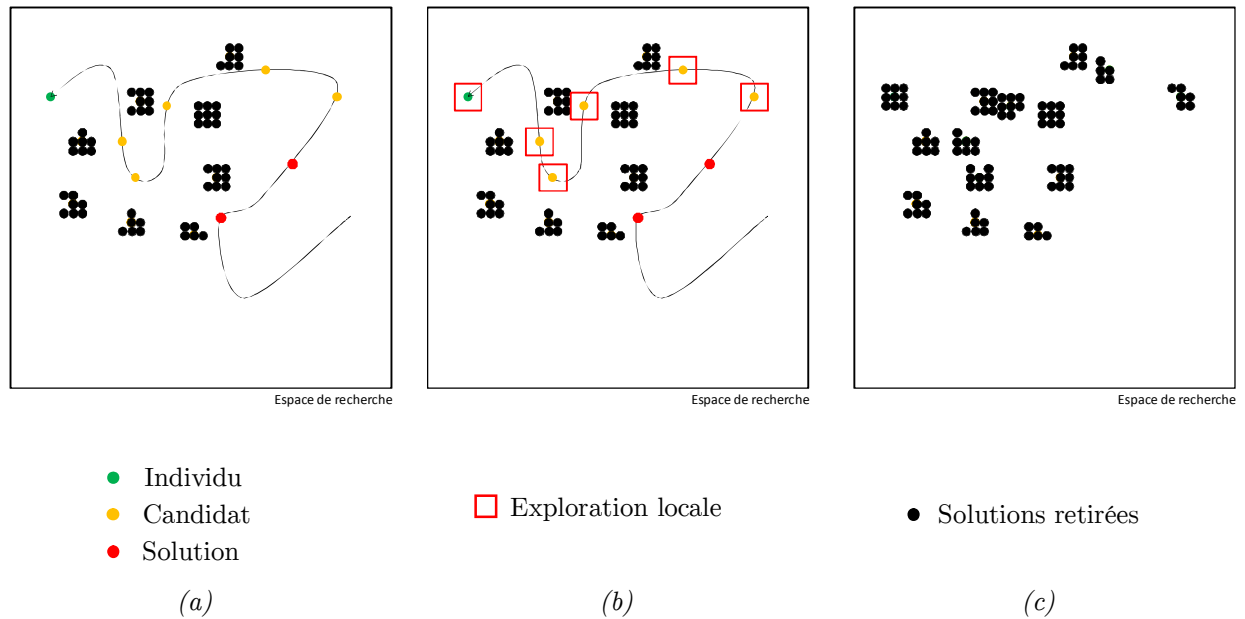


figure IV-21 : Représentation schématique d'une itération quelconque de la démarche

IV.2.1.2 Organigramme général

Un organigramme général de cette approche est représenté figure IV-22. Sur cette approche, deux cycles distincts sont présentés :

- Le cycle 1 : la recherche de solutions est uniquement menée à l'aide de l'algorithme génétique ;
- le cycle 2 : dans le cas d'un échec de l'obtention d'une solution satisfaisante pour le concepteur, celui-ci élargit le champ d'exploration à l'aide de la programmation par contraintes appliquées aux candidats identifiés lors de la convergence de l'algorithme génétique. Si la recherche hybride n'est toujours pas en mesure de proposer une solution satisfaisante, le concepteur peut décider de poursuivre la recherche après avoir méthodiquement réduit

l'espace d'exploration.

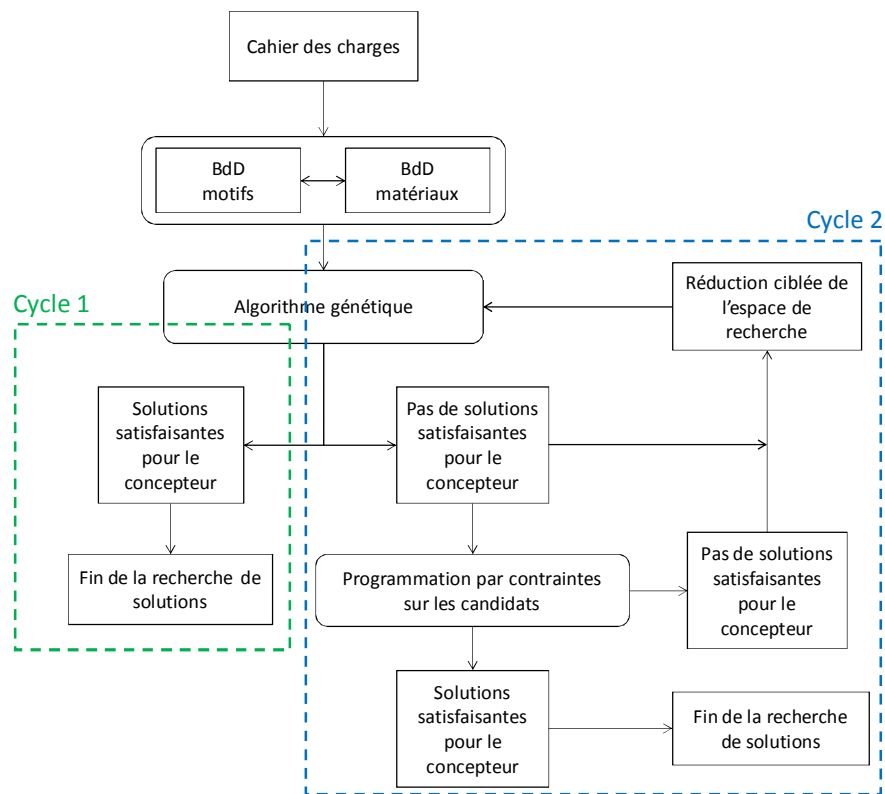


figure IV-22 : Démarche d'exploration exhaustive de l'espace de recherche proposée

IV.2.2 Les critères de diminution de l'espace de recherche

Cette démarche est une démarche itérative guidée mais elle n'en demeure pas moins adaptable à différentes situations de conception. En effet, en fin de chaque itération, des solutions sont supprimées de l'espace de recherche. Mais sur quel critère baser les choix des solutions qui vont être retirées ? Une discussion des critères de choix et des indicateurs associés est proposée dans ce paragraphe.

Dans l'application de cette démarche, l'exclusion est opérée à l'aide d'une forte pénalisation de la masse de l'individu considéré.

IV.2.2.1 Des critères technologiques

Toutes les situations de conception sont différentes et la démarche proposée ici peut s'appuyer sur des critères de suppression dépendant des exigences de la situation. Le concepteur est en mesure de rechercher une variété de solutions multimatériaux en

fonction par exemple :

- des compatibilités des matériaux constitutifs : les compatibilités au niveau de chaque couche du multimatériau ou entre les différentes couches du multimatériau peuvent être intégrées à la recherche de solutions ;
- du savoir-faire de l'entreprise : la démarche pourra être appliquée dans la recherche de solutions composées de matériaux propres au savoir-faire d'une entreprise ou liés à des procédés de mise en forme maîtrisés ;
- d'exigences spécifiques : par exemple la recherche d'une solution architecturée constituée d'un unique matériau.

IV.2.2.2 Un critère d'exclusion d'un matériau ou d'un motif

Le concepteur peut se concentrer sur l'architecture du multimatériau (ou avec le même raisonnement sur les matériaux constitutifs) s'il souhaite obtenir des solutions architecturées variées. La suppression de l'espace de recherche du motif géométrique d'une ou plusieurs couches du multimatériau va entraîner une diversification de l'architecture des solutions proposées. Pour le démontrer, la démarche est appliquée au cas d'étude préliminaire. Un critère d'exclusion de motif géométrique est utilisé dans le choix des solutions à retirer de l'espace de recherche. Ainsi, à chaque nouvelle itération de la démarche, sera proposée :

- la suppression, dans un premier temps, du motif géométrique constitutif de la couche supérieure de la solution optimale identifiée ;
- dans un deuxième temps, la suppression du motif géométrique constitutif de la couche inférieure de la solution optimale identifiée.

i. Application au motif géométrique de la couche supérieure

Ce paragraphe présente l'évolution des masses des solutions optimales de chaque population de l'algorithme en fonction de l'évolution des suppressions successives de motifs.

A la fin de sa première exécution, l'algorithme génétique propose une solution optimale constituée sur sa couche supérieure de « picots étagés ». Si le motif géométrique « picots étagés » est retiré de la base de données des motifs géométriques pouvant être

constitutifs de la couche supérieure, l'algorithme génétique propose une solution optimale constituée de picots cette fois-ci alignés sur la couche supérieure. Si à son tour le motif « picots alignés » est retiré de la base de données des motifs géométriques pouvant composer la couche supérieure du multimatériau, l'algorithme génétique converge vers une solution constituée d'ailettes. Un nouveau calcul est relancé en retirant cette fois-ci les ailettes sur la couche supérieure du multimatériau. L'AG n'est plus en mesure de proposer une solution ni même un candidat (l'astreinte thermique n'étant jamais vérifiée). Les individus optimaux identifiés à chaque itération de la démarche sont présentés dans le tableau IV-9.

| Itérations | Motif géométrique de la couche supérieure | Matériau de la couche supérieure | Motif géométrique de la couche inférieure | Masse (g) |
|-------------------|--|---|--|------------------|
| 1 | Picots étagés | Alliage de magnésium | Composite UD | 43 |
| 2 | Picots alignés | Alliage de magnésium | Composite UD | 56 |
| 3 | Ailettes | Alliage de magnésium | Composite tissé 0/90 | 116 |

tableau IV-9 : Composition architecture/matériaux du meilleur individu proposé à chaque itération de la démarche

Les résultats précédents obtenus sont concordants avec les résultats présentés dans le chapitre précédent. Du fait de la formulation assez restrictive de l'astreinte concernant la température de la face interne de la plaque, aucun individu ne peut être solution (ou candidat) s'il ne présente pas de motif spécifique favorisant la dissipation convective de chaleur sur sa face externe.

L'AG propose une solution optimisée suite à l'exclusion de motifs géométriques élémentaires du multimatériau. Cependant, à chaque nouvelle itération, la solution optimale proposée voit sa masse augmenter.

ii. Application au motif géométrique de la couche inférieure

La démarche est maintenant appliquée en se concentrant sur les motifs géométriques proposés au niveau de la couche inférieure du multimatériau. L'évolution des masses des solutions optimales identifiées pour chacune des populations à chaque itération de la démarche montre une augmentation de la masse de l'individu optimal proposé.

Les individus optimaux identifiés à chaque itération de la démarche sont présentés tableau IV-9.

| Itérations | Motif géométrique de la couche inférieure | Matériau de la couche supérieure | Motif géométrique de la couche supérieure | Masse (g) |
|------------|---|--------------------------------------|---|-----------|
| 1 | Composite UD | Alliage aluminium/fibres carbone UHM | Picots étagés | 43 |
| 2 | Composite tissé 0/90 | Alliage aluminium/fibres carbone UHM | Picots étagés | 56 |
| 3 | Composite renfort particulaire sphérique | Alliage aluminium/fibres SiC | Picots étagés | 61 |
| 4 | Composite fibres courtes alignées | Alliage aluminium/fibres carbone UHM | Picots étagés | 68 |
| 5 | Composite fibres courtes aléatoires plan | TiC/Fibres de beryllium | Picots étagés | 80 |
| 6 | Composite fibres courtes aléatoires 3D | Alliage aluminium/fibres aramide | Picots étagés | 111 |
| 7 | Mousse cellule ouverte | Alliage magnésium | Ailettes | 121 |
| 8 | Mousse cellule fermée | Alliage aluminium | Ailettes | 125 |
| 9 | Monolithique | Alliage aluminium | Picots étagés | 175 |

tableau IV-10 : Composition architecture/matériaux du meilleur individu proposé à chaque itération de la démarche

A la 9^{ème} itération de la démarche, l'individu optimal proposé par l'AG n'est pas solution au problème de conception. Cependant, l'algorithme identifie un candidat. Une programmation par contraintes est effectuée au voisinage de cet individu dans l'optique de vérifier si une solution existe dans son espace local de recherche. Les résultats sont présentés figure IV-23.

A partir de cette exploration locale, il est possible de vérifier que l'individu identifié par l'AG est l'optimum de l'espace local de recherche. Il n'existe donc pas de jeu de paramètres géométriques permettant la proposition d'une solution à partir du couple architecture/matériaux sélectionné.

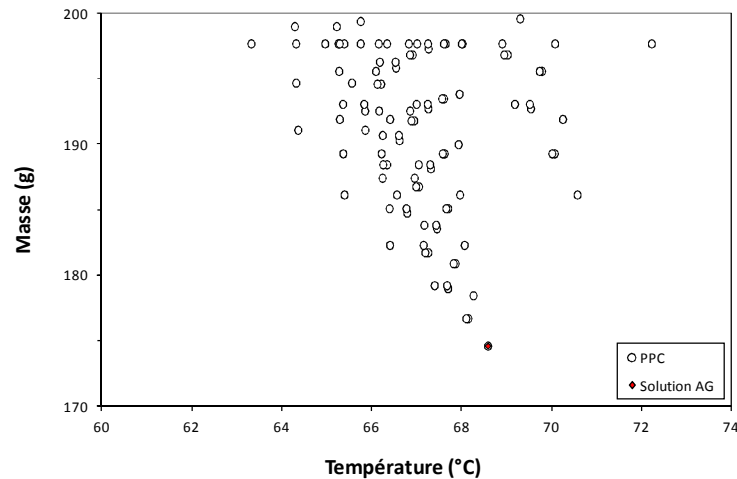


figure IV-23 : Masse des individus obtenus par programmation par contraintes effectuée au voisinage du candidat identifié par l'AG en fonction de la température

iii. Bilan

Qu'il compose la couche inférieure ou la couche supérieure, le retrait du motif géométrique constitutif de la solution optimale identifiée par l'algorithme génétique a permis la proposition de couples architecture/matériaux variés en réponse au même cahier des charges. Dans les deux cas présentés, la masse de l'individu optimal proposé augmente avec l'avancée de l'exploration de l'espace de recherche. Ceci valide d'une part, qu'en début de démarche de recherche, l'algorithme génétique est en mesure de cibler des solutions de qualité. D'autre part, le retrait de l'espace de recherche de solutions identifiées oblige l'algorithme génétique à emprunter des « chemins » différents permettant ainsi la proposition de couple architecture/matériaux différents.

Cependant, le choix des solutions qui vont être retirées de l'espace de recherche ainsi que le critère sur lequel ce choix s'appuie conditionnent la variété et le nombre des solutions qui peuvent être identifiées. Un critère trop sélectif va entraîner une diminution brutale de l'espace de recherche à chaque itération provoquant une faible diversité des solutions identifiées. Au contraire, un critère peu sélectif entraînera la proposition de solutions peu différentes. Le retrait du motif géométrique constitutif d'une des couches de la solution optimale identifiée a permis la validation du principe de la démarche et la proposition d'un premier critère de suppression. Cependant, l'utilisation d'un critère uniquement basé sur le ou les matériaux constitutifs d'une des couches du multimatériau, ou les motifs géométriques comme dans le cas précédent, entraînerait des diminutions

brutales de l'espace de recherche. Un compromis peut être trouvé en excluant non pas un motif ou un matériau mais un couple motif géométrique/matériau(x).

IV.2.2.3 Un critère d'exclusion du couple motif/matériau(x) de l'une des couches du multimatériau basé sur un indicateur statistique

Pour étudier la mise en place d'un tel critère, l'exploitation du calcul utilisé pour la validation de l'algorithme génétique appliqué à la résolution du cas d'étude préliminaire est reprise. Lors de son exécution, en examinant les deux populations sur les 150 générations, l'AG a identifié 9739 solutions. Parmi elles, 75 couples motif/matériaux ont été distingués. Une première possibilité serait d'exploiter, par couche, les tendances proposées par ces 75 couples motif/matériaux. La figure IV-24 présente la répartition des motifs et des matériaux pour chaque couche des 75 couples identifiés.

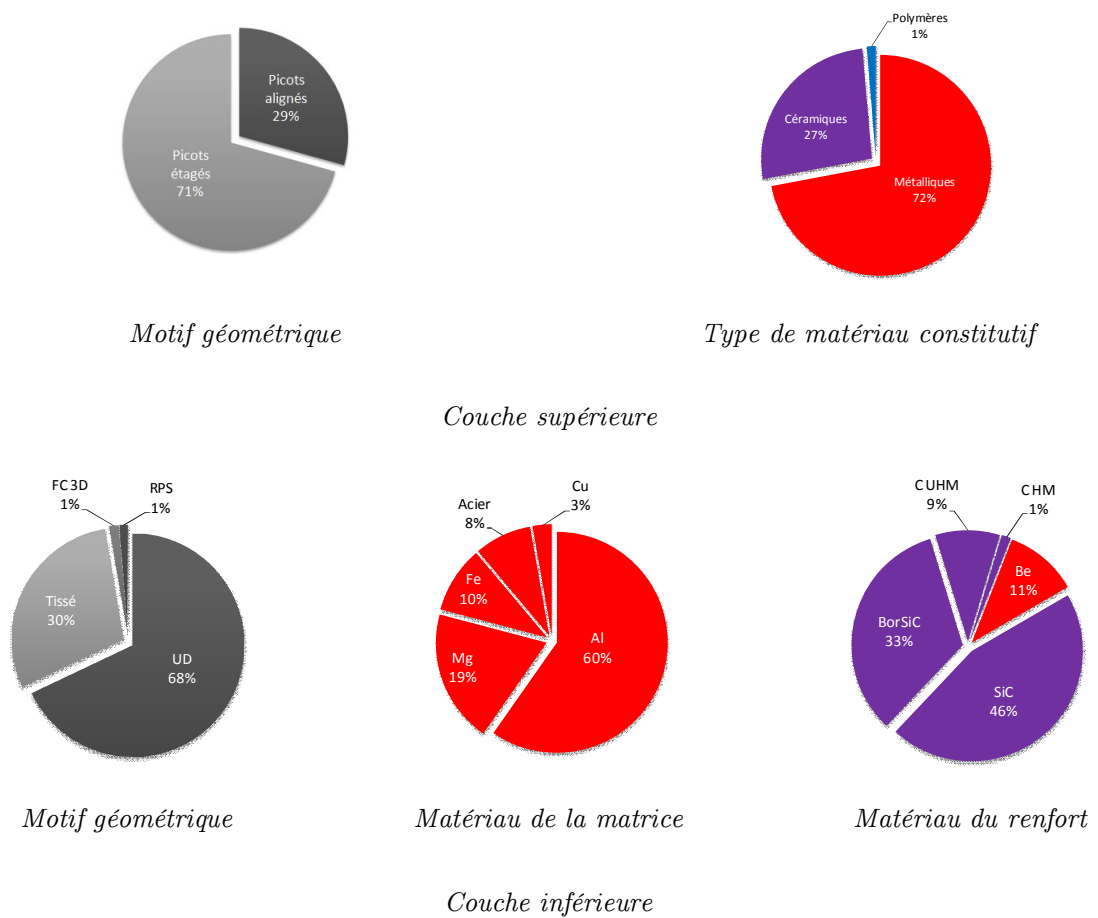


figure IV-24 : Détails des motifs et matériaux des solutions distinctes identifiées

avec UD : Composite à renforts unidirectionnels

Tissé : Composite à renfort bi-axial 0°/90°

RPS : Composite à renforts particuliers sphériques

FC 3D : Composite renforcé par des fibres courtes aléatoirement orientées

Ce critère, plus ciblé que celui utilisé précédemment, ne considérerait plus uniquement le motif géométrique d'une couche mais s'appuierait sur un couple motif géométrique/matériau(x). Ainsi, par exemple, les picots étagés en alliage de magnésium sur la couche supérieure ou les composites UD Aluminium/SiC sur la couche inférieure seraient dans le cas présent retirés de l'espace de recherche d'une itération à l'autre de la démarche.

Si 9739 solutions ont été identifiées lors de l'exécution de l'AG, il paraît encore plus pertinent d'exploiter les tendances issues de la représentation de chacun des 75 couples motifs/matériaux. Et là encore, des tendances fortes sont observables à l'image de la composition de la couche supérieure de l'ensemble des solutions traitées (figure IV-25). Sur les 9739 solutions traitées, 8457 solutions sont composées sur leur couche supérieure de picots étagés en alliage de magnésium. Basée sur ce type de critère, la démarche proposerait alors au concepteur de retirer les picots étagés en alliage de magnésium de l'espace de recherche.

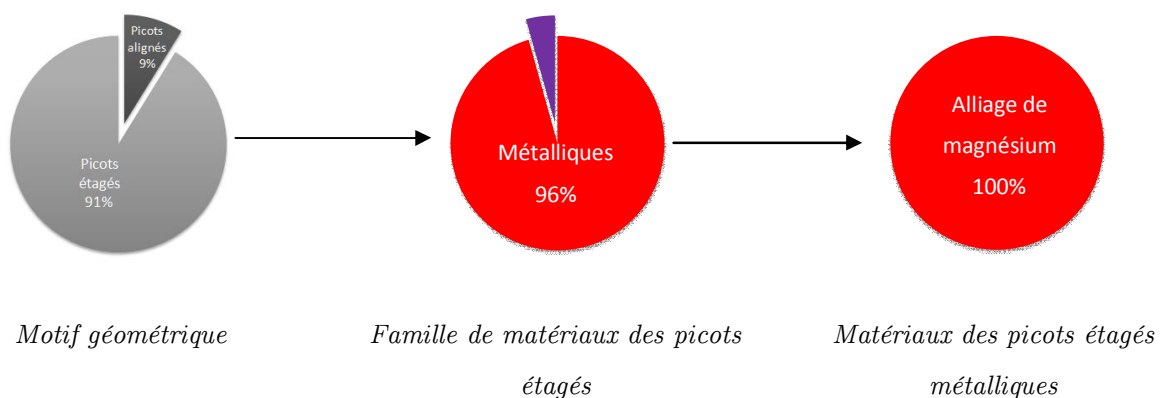


figure IV-25 : Composition motif géométrique/matériau de la couche supérieure de chaque solution identifiée

La représentation d'un couple motif géométrique/matériau, c'est-à-dire le nombre de fois qu'il a été constitutif d'une solution identifiée, est un indicateur cohérent. Celui-ci

peut toutefois devenir encore plus pertinent s'il devient couplé à un critère d'occurrence des couples envisagés. En effet, s'il paraît cohérent de retirer de l'espace de recherche des solutions suffisamment représentées, il semble encore plus adéquat de les retirer si elles sont en plus apparues tôt lors de la convergence de l'AG afin d'influencer plus fortement le trajet emprunté par l'algorithme génétique.

Un critère va être maintenant proposé s'appuyant sur la représentation des 75 couples architecture/matériaux parmi les 9739 solutions identifiées, appuyés sur deux indicateurs :

- le nombre de fois qu'un même couple architecture/matériaux est proposé pour la définition d'une solution ;
- la première génération à laquelle chacun des couples a été identifié.

i. Application au couple motif géométrique/matériau de la couche supérieure

L'exploitation du calcul précédent permet l'identification de 11 couples motif géométrique supérieur/matériau distincts. L'ensemble de ces couples constitutifs d'une solution identifiée lors de la convergence de l'AG est récapitulés tableau IV-11.

| | | | | | | |
|--------------------------|---------------|--------------------|------------------------------------|---------------|----------------------------|----------------------|
| Couple | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Motif géométrique | Picots étagés | Picots étagés | Picots alignés | Picots étagés | Picots alignés | Picots étagés |
| Matériau | Magnésium | Béton | Magnésium | Aluminium | Béton | Nitrures d'aluminium |
| Couple | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | |
| Motif géométrique | Picots étagés | Picots étagés | Picots étagés | Picots étagés | Picots étagés | |
| Matériau | Acier | Carbures de titane | Alliage Zinc/ Cuivre/ Titane | Fer | polyéthylène haute densité | |

tableau IV-11 : Couples motif géométrique supérieur/matériau distincts identifiés

Comme il a été précédemment dit, un couple en particulier (couple 1) est principalement répété. La représentation de chacun des couples identifiés est illustrée dans

la figure ci-dessous.

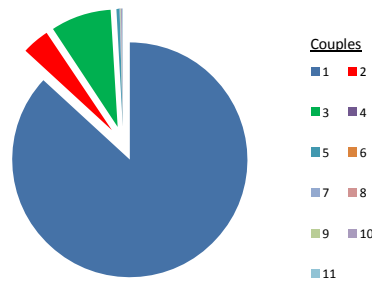


figure IV-26 : Pourcentage de répétition de chacun des couples identifiés parmi l'ensemble des solutions identifiées par l'AG au sein des deux populations de 80 individus au cours des 150 générations

A cet indicateur de représentation, l'association d'un indicateur renseignant de la génération à laquelle chacun de ces couples a été identifié pour la première fois permet d'obtenir la figure IV-27.

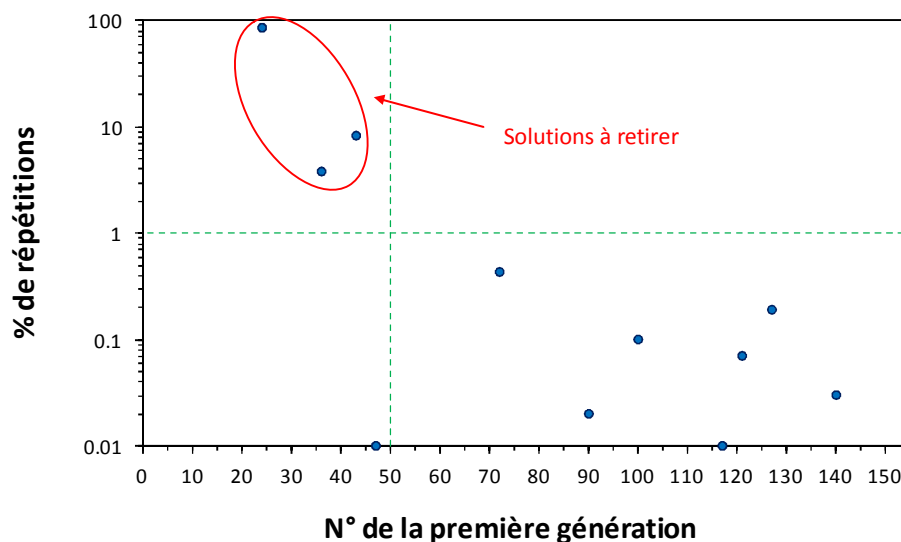


figure IV-27 : Pourcentage de répétition des couples identifiés par l'AG en fonction du numéro de la première génération d'apparition

Les couples proposant une représentation d'au moins 1% et ayant été identifiés avant la 50^{ème} génération seront considérés dans la suite de ce travail comme pertinents pour la suppression. Sur le graphique figure IV-27, trois couples sont concernés. Ceux-ci sont donc retirés de l'espace de recherche. Basée sur ce même critère, la démarche de recherche est poursuivie sur 2 itérations supplémentaires. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau IV-12.

| Itération | 1 | 2 | 3 |
|--|---|--|---|
| Nombre de solutions identifiées | 9739 | 1225 | 6735 |
| Nombres de couples différents identifiés | 11 | 6 | 12 |
| Nombres de nouveaux couples | X | 6 | 8 |
| Nombre de couples à retirer | 3 | 3 | 2 |
| Couples retirés (Motif/Matériau) | Picots étagés/ Mg Picots alignés/ Mg Picots étagés /TiC | Ailettes/Al. 6061 Picots étagés/ Al. 6061 Picots alignés/ Al. 6061 | Picots étagés/ Al. A332 Picots alignés/ Al. A332 |

tableau IV-12 : Résultats obtenus lors de la démarche d'exploration

Cette démarche d'élimination favorise la diversification dans la stratégie de recherche de l'AG expliquant le plus grand nombre de solutions différents identifiées d'une itération à l'autre.

ii. Bilan

Les résultats précédents, dont un récapitulatif des solutions optimales est présenté dans le tableau IV-13 montrent que le critère proposé, basé sur des indicateurs de représentativité et d'occurrence, permet la proposition de nouvelles solutions architecturées.

| Itération | 1 | 2 | 3 |
|---------------------|-------------------|-------------------------|-------------------------|
| Solutions optimales | Picots étagés/ Mg | Picots étagés/ Al. 6061 | Picots étagés/ Al. A332 |

tableau IV-13 : Solutions optimales obtenues à chaque itération de la démarche

Ces résultats confirment aussi que retirer de l'espace de recherche des solutions oblige l'AG à emprunter des chemins différents lors de sa convergence. En effet, sur les 3 itérations précédentes de la démarche, 29 couples motif géométrique supérieur/matériau ont été identifiés et seulement 4 d'entre eux sont communs aux 3 parcours. Il faut noter que dans le cas de cette étude, les solutions ciblées à chaque itération n'ont pas été retirées de l'espace de recherche mais fortement pénalisées. La manière dont un individu est pénalisé lors de son exploration par l'AG doit influencer sur le comportement de l'algorithme.

Dans cette étude, tous les individus ciblés sont pénalisés de la même manière.

Le critère mixte précédent est moins sélectif qu'un critère uniquement basé sur le motif géométrique constitutif d'une couche du multimatériau. De ce fait, ce critère va permettre la proposition d'un nombre plus important de solutions variées.

IV.2.2.4 Un critère architecture/matériaux

Un dernier critère est enfin proposé. Celui-ci ne s'appuie pas uniquement sur un couple motif géométrique /matériau(x) d'une couche mais sur l'ensemble des motifs géométriques/matériau(x) qui composent le multimatériau. La proposition de ce critère architecture/matériaux va s'appuyer à nouveau sur l'exploitation du calcul utilisé dans le chapitre précédent pour la validation de l'algorithme génétique appliqué au cas d'étude préliminaire.

75 couples architecture/matériaux distincts sont identifiés. La figure IV-28 illustre la représentation de chacun des 75 couples architecture/matériaux en fonction du numéro de génération de leur première apparition.

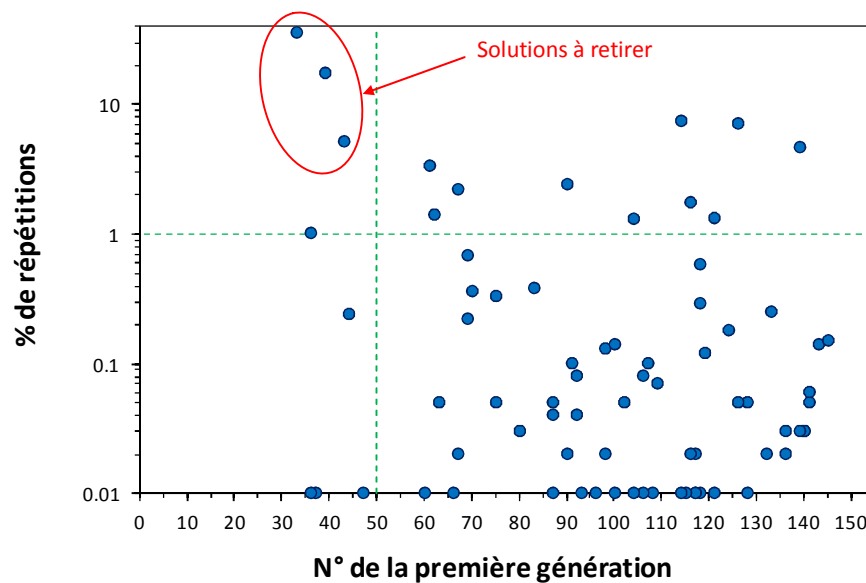


figure IV-28 : Pourcentage de répétition des couples identifiés par l'AG en fonction du numéro de la première génération d'apparition

Sur les 75 couples, seulement 14 ont un taux de représentation supérieur à 1% et uniquement 5 supérieur à 5%. Nous pourrions filtrer et retirer de l'espace de recherche les couples architecture/matériaux apparus avant la 50^{ème} génération et présentant un taux

de représentation supérieur à 1%. Ainsi 3 couples, dont un détail de la composition est présenté tableau IV-14, sont concernés.

| Couple | Motif géométrique de la couche supérieure | Matériau de la couche supérieure | Motif géométrique de la couche inférieure | Matériaux de la couche inférieure |
|--------|---|----------------------------------|---|-----------------------------------|
| 1 | Picots alignés | Alliage de magnésium | Composite tissé 0/90 | Aluminium/BorSiC |
| 2 | Picots étagés | Alliage de magnésium | Composite UD | Aluminium/SiC |
| 3 | Picots étagés | Alliage de magnésium | Composite tissé 0/90 | Aluminium/SiC |

tableau IV-14 : Couple architecture/matériaux retirés de l'espace de recherche

Ces couples architecture/matériaux associés à chacun d'entre eux sont retirés de l'espace de recherche. En retirant ces familles de solutions, 59% de l'espace de recherche exploré lors de la dernière exécution de l'algorithme génétique est retiré. L'exclusion de ces trois couples n'interdit pas par la suite une quelconque association de couples motif géométrique/matériau(x) parmi l'espace des solutions encore non exploité. Par exemple, une solution picots alignés en alliage de magnésium associé à un composite UD aluminium/SiC sera autorisée.

Ce dernier critère permet donc de n'empêcher aucune association à une itération i de la démarche d'exploration. S'il va permettre la proposition de nombreuses solutions aux architectures variées, une démarche d'exploration plus longue sera sans doute nécessaire avant de se voir proposer des solutions sensiblement diversifiées.

Des critères technologiques peuvent être proposés permettant d'adapter la démarche aux besoins spécifiques de l'utilisateur. Par ailleurs, des critères généraux ont été exploités permettant de guider le concepteur dans une démarche d'exploration générale de l'espace de recherche.

IV.3 Conclusion

L'objectif de la première partie de ce chapitre était de proposer une stratégie d'exploration hybride de l'espace de recherche. L'hybridation a ainsi permis une exploitation exhaustive de l'espace local de recherche autour d'individus identifiés par l'algorithme génétique à des moments très différents de son exécution. Le recours à un

algorithme de programmation par contraintes a ainsi démontré un intérêt triple en permettant :

- la validation de la solution optimale en l'identifiant comme confondue avec l'optimum de l'espace local de recherche ;
- la proposition d'une solution optimisée vis-à-vis d'un individu de départ déjà solution ;
- la proposition d'une solution optimisée, vis-à-vis d'un individu de départ n'étant pas solution mais candidat, c'est à dire vérifiant toutes les contraintes à l'exception de celle relative à la masse.

L'objectif de la deuxième partie de ce chapitre était de proposer une démarche de recherche permettant une exploitation méthodique de l'espace global des solutions. Cette démarche, justifiée par le besoin d'offrir au concepteur des solutions aux architectures variées répondant à un même cahier des charges, a été construite sur une exploration approfondie de l'espace de recherche. Celle-ci s'est en effet appuyée sur une diminution itérative de l'espace global de recherche à partir de la suppression de solutions identifiées par l'exploration hybride précédemment validée. L'application de la démarche au cas d'étude préliminaire a permis la validation de son principe démontrant :

- la cohérence des résultats proposés par l'algorithme génétique ;
- l'intérêt de son hybridation avec un algorithme de programmation par contraintes pour élargir l'exploitation de l'espace des solutions ;
- la capacité de la démarche à proposer des solutions multimatériaux variées.

La démarche de recherche a imposé le recours à des critères permettant de choisir les solutions qui vont être retirées de l'espace de recherche. Appuyés sur des indicateurs exploitant l'ensemble de l'espace des solutions explorées lors de la convergence de l'AG, des critères ont été présentés pouvant permettre une démarche systématique pour guider le concepteur ou s'adapter à des situations de conception définies par le concepteur.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

La difficulté du choix d'un multimatériau est liée au nombre de paramètres qui le définissent, ces choix se portent aussi bien sur des paramètres discrets (matériaux) que continus (composition, distribution). En réponse à ces différentes problématiques, les méthodes de conception développées ont proposé de figer en amont de l'étude l'architecture ou les constituants des multimatériaux. Ces hypothèses ont alors permis la proposition d'approches prenant en compte les nombreux paramètres de conception libres tout en présupposant de l'architecture ou des constituants du multimatériau. L'objectif du travail développé dans ce manuscrit de thèse a été la proposition d'une démarche de conception dans laquelle le concepteur effectue un choix de l'architecture et des constituants du multimatériau. La complexité que présente le choix d'une architecture et des matériaux d'un multimatériau est inhérente à l'articulation de ces choix et à leur forte interaction. La difficulté de définir des critères de sélection dissociés propres à l'architecture ou aux matériaux a orienté la démarche développée dans ce manuscrit vers un choix simultané. Les problématiques identifiées sont alors concentrées d'une part sur la définition du multimatériau à ses différentes échelles et d'autre part, sur la démarche de choix simultané permettant la proposition de solutions multimatériaux variées.

Les différentes échelles qui cohabitent au sein du multimatériau et qui le définissent ont nécessité dans un premier temps la proposition d'une structuration de l'architecture globale d'un multimatériau. Cette structuration a permis de proposer un cadre général dans la définition de l'architecture d'un multimatériau. Dès lors, il a été possible de réduire le champ d'investigation de l'étude à la conception d'une architecture multicouche.

La mise en place d'une démarche de conception de multimatériaux débute par la définition d'une stratégie de sélection et la définition des concepts mis en jeu. Basé sur une stratégie de sélection par recherche libre, ce travail s'est appuyé sur la création et l'association de deux bases de données. La première, dédiée aux motifs géométriques élémentaires, a été associée à une seconde base de données propre aux matériaux. Une démarche de conception s'appuyant sur des bases de données propose d'intéressantes

perspectives. En effet, la force d'une base de données réside dans sa capacité à être enrichie au cours du temps. Il était impossible dans le cadre de ce travail de considérer toutes les morphologies existantes et de nombreux travaux académiques démontrent l'intérêt d'exploiter de nouvelles architectures. A l'image de l'étude de Wang et al. [WANG, 2008] proposant des modèles d'homogénéisation de mousses à cellules ouvertes à parois pleines ou creuses ou des travaux de Kooistra et al. [KOOISTRA, 2004] considérant des treillis composés de cellules tétraédriques, de nombreuses recherches ne sont aujourd'hui qu'à un stade théorique mais seront demain, des solutions dans des futurs défis industriels.

Des modèles analytiques d'homogénéisation permettent l'évaluation des propriétés équivalentes des motifs géométriques élémentaires de la base de données en fonction de leurs matériaux constitutifs et de paramètres géométriques. La pertinence des solutions proposées est intrinsèquement liée à l'évaluation des propriétés d'un multimatériau donc aux modèles analytiques d'homogénéisation associés. Les modèles analytiques ont été sélectionnés en fonction de l'erreur engendrée sur la propriété évaluée sur l'intervalle de validité identifié et sur le nombre de paramètres géométriques considérés.

L'approche développée a été appliquée au cahier des charges d'une pièce de packaging de l'électronique embarquée dans l'aéronautique. Le second chapitre de ce travail s'est donc concentré sur la pièce utilisée comme cas d'étude. La déclinaison du cahier des charges a permis une meilleure compréhension des difficultés de conception que peut présenter la pièce. Basées sur des simulations numériques, des hypothèses ont été ensuite présentées de manière à proposer un modèle numérique représentatif du cas industriel.

Sélectionner simultanément un couple architecture/matériaux en réponse à un cahier des charges, c'est se guider dans un espace de recherche défini par l'association de la base de données de motifs géométriques et la base de données de matériaux. Une revue des algorithmes d'optimisation classiques adaptés à la résolution de problème d'optimisation combinatoire a été présentée. Du fait de sa capacité à évoluer rapidement au sein de très vastes espaces de solutions, un algorithme génétique a été retenu comme outil de sélection. Une modélisation 1D a tout d'abord été définie pour permettre une résolution analytique des fonctions de contraintes et de la fonction objectif. Une étude de

dépendance de ses paramètres génétiques appliquée à la modélisation 1D a été proposée dans l'optique de définir une configuration de l'algorithme assurant une convergence maîtrisée. L'application de l'algorithme génétique à la modélisation 1D du problème de conception a par la suite permis de valider la cohérence du choix d'un tel outil. Le couplage de l'algorithme génétique à des simulations éléments finis a permis enfin une résolution du cas industriel à l'aide d'une modélisation 3D du problème de conception. L'algorithme génétique utilisé pour les deux cas de conception a permis la proposition de solutions dans des temps de calculs acceptables.

L'utilisation d'un algorithme génétique dans la résolution des problèmes de conception traités dans ce manuscrit a offert la proposition rapide de solutions multimatériaux. Toutefois, un tel outil n'apporte que très peu d'informations au concepteur sur la qualité de la solution proposée vis-à-vis des autres solutions de l'espace de recherche. La qualification d'une solution vis-à-vis de l'optimum global du problème passe par une exploitation totale de l'espace de recherche et n'est pas envisageable du fait des temps de calcul associés. Le dernier chapitre de ce travail s'est intéressé dans un premier temps à la qualification des solutions explorées par l'algorithme génétique vis-à-vis d'optimum locaux de l'espace de recherche. Après une revue des stratégies usuelles d'hybridation, l'hybridation de l'algorithme génétique avec un algorithme de programmation sous contrainte a été proposée afin de venir explorer exhaustivement de manière ponctuelle le voisinage de solutions identifiées par l'AG. Cette stratégie de recherche hybride a été la base de la démarche de recherche proposée dans la dernière partie de ce manuscrit. Ainsi, le dernier chapitre de ce travail est axé autour de la proposition d'une démarche générale de recherche itérative. Cette démarche est basée sur une exploration à la fois globale et locale de l'espace de recherche. A chaque itération de la démarche, une redéfinition de l'espace de recherche a été menée à partir du retrait de solutions identifiées par l'exploration globale. Des indicateurs, aussi bien technologiques que généraux, ont alors été introduits validant la démarche proposée dans la recherche de solutions au cas d'étude préliminaire.

Plusieurs perspectives peuvent être soulignées pour compléter certains aspects de ce travail. Tout d'abord, la définition d'un multimatériau proposée dans ce travail peut être discutée. Si un multimatériau est défini par la combinaison de ses matériaux

constitutifs et la manière dont ils sont agencés, il est aussi caractérisé par la nature de ses interfaces. Les interfaces ont délibérément été considérées comme parfaites dans ce travail pour réduire le nombre déjà considérable de paramètres de conception. Dans un travail futur, la prise en compte des interfaces entre les couches du multicouche pourrait par exemple être introduite dans les propriétés homogénéisées du multicouche.

Par ailleurs, la question de la richesse des bases de données et leurs associations à des modèles représentatifs peut être posée. En effet, la base de données a été construite à partir de motifs géométriques représentatifs des multimatériaux généralement rencontrés. A ces motifs géométriques ont été associés des modèles analytiques d'homogénéisation sélectionnés dans la littérature. Dans certaines situations de conception, le concepteur peut vouloir intégrer des motifs géométriques dans la recherche de solutions multimatériaux et ne pas disposer des modèles analytiques d'homogénéisation. Il paraîtrait alors intéressant d'intégrer à la démarche de conception une étape d'élaboration d'un métamodèle permettant la définition des propriétés homogénéisées de motifs géométriques personnalisés. Par ailleurs, dans le cas où des modèles d'homogénéisation d'ordre 2 engendreraient une erreur trop importante sur l'évaluation d'une propriété physique, des modèles d'homogénéisation d'ordre 3 pourraient être préférés. Le recours à un modèle d'ordre supérieur nécessite des informations microstructurales et augmente considérablement l'espace de recherche du fait d'un nombre plus grand de paramètres de conception considérés.

Concernant le fonctionnement de l'algorithme génétique et son efficacité, il convient de noter que si l'étude des paramètres génétiques a permis la définition d'un jeu de paramètres assurant une convergence maîtrisée de l'algorithme tout en assurant un nombre de calcul limité, une démarche plus systématique pourrait être proposée. Cette démarche intégrerait :

- le choix de la (ou des) population(s) initiale(s). Il est possible de travailler sur l'évolution de l'algorithme dans l'espace de recherche en choisissant judicieusement la population initiale. Ce type de démarche peut favoriser soit une stratégie d'intensification ou de diversification dans l'exploration de l'espace de solution ;
- la définition de paramètres génétiques dynamiques. Une adaptation des probabilités d'opérations génétiques sur les individus favoriserait l'amélioration de

la solution optimale proposée.

Enfin, la question des procédés de mise en œuvre des multimatériaux mérite d'être soulevée. En effet, aucun critère de faisabilité n'est associé à la proposition d'une solution multimatériau. Si cette démarche ne paraît pas limitante dans la recherche de concept de solutions, elle peut rapidement le devenir dans le cas d'une recherche de solutions industrialisables. A l'image des critères de compatibilité entre matériaux introduits dans le dernier chapitre, des critères de faisabilité pourraient être considérés et associés à des couples architecture/matériaux.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Aceves C.M., Skordos A.A. & Sutcliffe M.P.F. (2008). Design selection methodology for composite structures. *Materials & Design*, 29(2), 418–426. doi:10.1016/j.matdes.2007.01.014.

Airbus. (2013). Éléments de spécification thermique d'un matériau alternatif pour le capot supérieur de la carte ABPM.

Ashby M.F, Bréchet Y. & Salvo L. (2001). *Sélection des matériaux et des procédés de mise en oeuvre*. PPUR presses polytechniques.

Ashby M.F. (1991). Overview No. 92: Materials and shape. *Acta Metallurgica et Materialia*, 39(6), 1025–1039. doi:10.1016/0956-7151(91)90189-8.

Ashby M.F. (1993). Criteria for selecting the components of composites. *Acta Metallurgica et Materialia*, 41(5), 1313–1335. doi:10.1016/0956-7151(93)90242-K

Ashby M.F. (2006). The properties of foams and lattices. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 364(1838), 15–30. doi:10.1098/rsta.2005.1678.

Ashby M.F. & Bréchet Y. (2003). Designing hybrid materials. *Acta Materialia*, 51(19), 5801–5821. doi:10.1016/S1359-6454(03)00441-5.

Ashby M.F., Bréchet Y., Cebon D. & Salvo L. (2004). Selection strategies for materials and processes. *Materials & Design*, 25(1), 51–67. doi:10.1016/S0261-3069(03)00159-6.

Ashby M.F. & Medalist R.F.M. (1983). The mechanical properties of cellular solids. *Metallurgical Transactions A*, 14(9), 1755–1769. doi:10.1007/BF02645546

Autin B. (2006). *Les métaheuristiques en optimisation combinatoire*.

Baley C. (2003). Contribution à l'étude de matériaux composites à matrice organique renforcés par des fibres de lin.

Barnier N. & Brisset P. (1998). Optimization by hybridization of a genetic algorithm with constraint satisfaction techniques. *The 1998 IEEE International Conference on*

Evolutionary Computation Proceedings, 1998. IEEE World Congress on Computational Intelligence (pp. 645–649). doi:10.1109/ICEC.1998.700115.

Bergander A. & Salmén L. (2002). Cell wall properties and their effects on the mechanical properties of fibers. *Journal of Materials Science*, 37(1), 151–156. doi:10.1023/A:1013115925679.

Berthelot J.M. (2005). *Matériaux composites : comportement mécanique et analyse des structures* (4^e Ed.).

Bieber P., Boniol F., Boyer M., Noulard E. & Pagetti. C. (2012). New Challenges for Future Avionic Architectures. AerospaceLab.

Blum C. & Roli A. (2003). Metaheuristics in Combinatorial Optimization: Overview and Conceptual Comparison. *ACM Comput. Surv.*, 35(3), 268–308. doi:10.1145/937503.937505.

Bollen P., Quiévy N., Huynen I., Bailly C., Detrembleur C., Thomassin J. M. & Pardoën T. (2013). Multifunctional architected materials for electromagnetic absorption. *Scripta Materialia*, 68(1), 50–54. doi:10.1016/j.scriptamat.2012.05.011.

Borne P., Dumitru P., Florin-Gheorghe F. & Dan S. (2013). *Optimisation en sciences de l'ingénieur: Méthodes exactes*. Lavoisier.

Bouaziz O., Bréchet Y. & Embury J.D. (2008). Heterogeneous and Architected Materials: A Possible Strategy for Design of Structural Materials. *Advanced Engineering Materials*, 10(1-2), 24–36. doi:10.1002/adem.200700289.

Boudenne A. (2003). *Étude expérimentale et théorique des propriétés thermophysiques de matériaux composites à matrice polymère*. Paris 12.

Boussu F., Begus V., Boussu F. & Begus V. (2008). *Method of manufacturing a composite, especially a bulletproof composite, and composite obtained*. <https://www.google.com/patents/US20100215953>. Accessed 6 January 2016.

Bréchet Y. & Embury J.D. (2013). Architected materials: Expanding materials space. *Scripta Materialia*, 68(1), 1–3. doi:10.1016/j.scriptamat.2012.07.038.

Burke E.K., Cowling P.I. & Keuthen R. (2001). Effective Local and Guided Variable Neighbourhood Search Methods for the Asymmetric Travelling Salesman Problem. In E. J. W. Boers (Ed.), *Applications of Evolutionary Computing* (pp. 203–212).

-
- Castillo G. (2004).** *Contribution méthodologique à la conception des multimatériaux : application à la définition d'un multimatériaux de bâti de machine outil.* Bordeaux.
- Chandrasekaran B. (1990).** Design Problem Solving: A Task Analysis. *AI Magazine*, 11(4), 59. doi:10.1609/aimag.v11i4.857.
- Chen C.H. & Cheng C.H. (1996).** Effective elastic moduli of misoriented short-fiber composites. *International Journal of Solids and Structures*, 33(17), 2519–2539. doi:10.1016/0020-7683(95)00160-3.
- Collignan A. (2011).** *Méthode d'optimisation et d'aide à la décision en conception mécanique : Application à une structure aéronautique* (phdthesis). Université Sciences et Technologies - Bordeaux. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00662303/document>.
- Czarn A., MacNish C., Vijayan K., Turlach B. & Gupta R. (2004).** Statistical Exploratory Analysis of Genetic Algorithms. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 8(4), 405–421. doi:10.1109/TEVC.2004.831262.
- Dermakar S. (1990).** Matériaux composites à matrice métallique.
- Deshpande V.S., Fleck N.A. & Ashby M.F. (2001).** Effective properties of the octet-truss lattice material, 49, 1747–1769.
- Dietz A.R. (2004).** *Optimisation multicritère pour la conception d'ateliers discontinus multiproduits : aspects économique et environnemental.* Toulouse, INPT.
- Dirrenberger J. (2012).** *Propriétés effectives de matériaux architecturés.* Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris. Retrieved from <http://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00797363>.
- Dréo J., Pétrowski A., Taillard E.D. & Siarry P. (2003).** Métaheuristiques pour l'optimisation difficile.
- Dunlop J.W.C. & Brechet Y. (2009).** Architected Structural Materials: A Parallel Between Nature and Engineering. *MRS Online Proceedings Library*, 1188, null–null. doi:10.1557/PROC-1188-LL09-04.
- Dunlop J.W.C. & Fratzl P. (2013).** Multilevel architectures in natural materials. *Scripta Materialia*, 68(1), 8–12. doi:10.1016/j.scriptamat.2012.05.045.
- Duratti L., Salvo L., Landru D. & Bréchet Y. (2002).** Selecting the Components of Polymeric Composites. *Advanced Engineering Materials*, 4(6), 367–371. doi:10.1002/1527-
-

2648(20020605)4:6<367::AID-ADEM367>3.0.CO;2-7.

Dyskin A.V., Estrin Y., Kanel-Belov A.J. & Pasternak E. (2001). A new concept in design of materials and structures: assemblies of interlocked tetrahedron-shaped elements. *Scripta Materialia*, 44(12), 2689–2694. doi:10.1016/S1359-6462(01)00968-X.

Dyskin A.V., Estrin Y., Kanel-Belov A.J. & Pasternak E. (2003). A new principle in design of composite materials: reinforcement by interlocked elements. *Composites Science and Technology*, 63(3-4), 483–491. doi:10.1016/S0266-3538(02)00228-2.

Edwards K.L. (2005). Selecting materials for optimum use in engineering components. *Materials & Design*, 26(5), 469–473. doi:10.1016/j.matdes.2004.07.004.

Etchart P. (2007). *Méthode de conception de structures multimatériaux mécanocollées*. Bordeaux. <http://www.theses.fr/2007BOR13349>.

Fallet A., Lhuissier P., Salvo L., Martin C.L., Wiegmann A. & Kabel M. (2013). Multifunctional optimization of random hollow sphere stackings. *Scripta Materialia*, 68(1), 35–38. doi:10.1016/j.scriptamat.2012.07.039.

Fallet A. (2008). *Structure et propriétés mécaniques d'empilements aléatoires de sphères creuses : caractérisation et modélisation*. Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG. <http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00396409>.

Gasser S., Bréchet Y., & Paun F. (2004). Materials Design for Acoustic Liners: an Example of Tailored Multifunctional Materials. *Advanced Engineering Materials*, 6(1-2), 97–102. doi:10.1002/adem.200300545.

Gasser S., Paun F. & Bréchet Y. (2004). Finite elements computation for the elastic properties of a regular stacking of hollow spheres. *Materials Science and Engineering: A*, 379(1-2), 240–244. doi:10.1016/j.msea.2004.02.002.

Gauthier R. (1995). *Qualité en conception de produits nouveaux. "proposition d'une méthode de fiabilisation du processus de management de l'information"* (phdthesis). Ecole nationale supérieure d'arts et métiers - ENSAM. Retrieved from <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00005718/document>.

Gharbi S., Harmand S. & Jabrallah S. B. (2015). Experimental comparison between different configurations of PCM based heat sinks for cooling electronic components. *Applied Thermal Engineering*, 87, 454–462. doi:10.1016/j.applthermaleng.2015.05.024.

Giacobi S., Kromm F. X., Wargnier H., & Danis M. (2010). Filtration in

materials selection and multi-materials design. *Materials & Design*, 31(4), 1842–1847. doi:10.1016/j.matdes.2009.11.005.

Giacobi S. (2009). *Méthode de conception de multimatériaux à architecture multicouche : application à la conception d'une canalisation sous-marine*. Bordeaux. <http://www.theses.fr/2009BOR13829>.

Gibson L.J., & Ashby M.F. (1999). *Cellular Solids: Structure and Properties*. Cambridge University Press.

Glover F. (1977). Heuristics for integer programming using surrogate constraints. *Decision Sciences*, 8(1), 156–166.

Glover F. & Laguna M. (2013). Tabu Search. In P.M. Pardalos, D.Z. Du & R.L. Graham (Eds.), *Handbook of Combinatorial Optimization* (pp. 3261–3362). http://link.springer.com/referenceworkentry/10.1007/978-1-4419-7997-1_17.

Glover F.W. & Kochenberger G.A. (2006). *Handbook of Metaheuristics*. Springer Science & Business Media.

Hao J.K., Galinier P. & Habib M. (1999). Métaheuristiques pour l'optimisation combinatoire et l'affectation sous contraintes. *Revue d'intelligence artificielle*, 13(2), 283–324.

Hashin Z. (1983). Analysis of Composite Materials—A Survey. *Journal of Applied Mechanics*, 50(3), 481–505. doi:10.1115/1.3167081.

Hatta H. & Taya M. (1985). Effective thermal conductivity of a misoriented short fiber composite. *Journal of Applied Physics*, 58(7), 2478–2486. doi:doi:10.1063/1.335924.

Hayes A.M., Wang A., Dempsey B.M. & McDowell D.L. (2004). Mechanics of linear cellular alloys. *Mechanics of Materials*, 36(8), 691–713. doi:10.1016/j.mechmat.2003.06.001.

Holland J.H. (1992). *Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*. MIT press.

Irisarri F.X. (2009). *Stratégie de calcul pour l'optimisation multiobjectif des structures composites* (phd). Université de Toulouse, Université Toulouse III - Paul Sabatier. <http://thesesups.ups-tlse.fr/506/>.

Ivanova M., Avenas Y., Schaeffer C., Dezord J.B. & Schulz-Harder J. (2006).

Heat Pipe Integrated in Direct Bonded Copper (DBC) Technology for Cooling of Power Electronics Packaging. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 21(6), 1541–1547. doi:10.1109/TPEL.2006.882974.

Jiang Q.C., Li X.L. & Wang H.Y. (2003). Fabrication of TiC particulate reinforced magnesium matrix composites. *Scripta Materialia*, 48(6), 713–717. doi:10.1016/S1359-6462(02)00551-1.

Jourdan L., Basseur M. & Talbi E.G. (2009). Hybridizing exact methods and metaheuristics: A taxonomy. *European Journal of Operational Research*, 199(3), 620–629. doi:10.1016/j.ejor.2007.07.035.

Khan W.A., Cuham J.R. & Yovanovich M.M. (2008). Modeling of cylindrical pin-fin heat sinks for electronic packaging (pp. 125–134). IEEE. doi:10.1109/STHERM.2005.1412168.

Kooistra G.W., Deshpande V.S. & Wadley H.N. (2004). Compressive behavior of age hardenable tetrahedral lattice truss structures made from aluminium. *Acta Materialia*, 52(14), 4229–4237. doi:10.1016/j.actamat.2004.05.039.

Kromm F.X. (2002). *Contribution à la définition d'une démarche de conception de multimatériaux: Application à la mise en oeuvre d'un réservoir permettant le déconfinement de matières énergétiques.* Université Bordeaux.

Kromm F.X., Quenisset J.M., Harry R. & Lorriot T. (2002). An Example of Multimaterials Design. *Advanced Engineering Materials*, 4(6), 371–374. doi:10.1002/1527-2648(20020605)4:6<371::AID-ADEM371>3.0.CO;2-R.

Kromm F. X., Quenisset J. M., Lorriot T., Harry R. & Wargnier H. (2007). Definition of a multimaterials design method. *Materials & Design*, 28(10), 2641–2646. doi:10.1016/j.matdes.2006.09.019.

Laszczyk L. (2011). *Homogénéisation et optimisation topologique de panneaux architecturés.* Université de Grenoble. <http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00721807>.

Laszczyk L., Dendievel R., Bouaziz O., Bréchet Y. & Parry G. (2009). Design of Architected Sandwich Core Materials using Topological Optimization Methods. *MRS Online Proceedings Library*, 1188, null–null. doi:10.1557/PROC-1188-LL05-02.

Le Riche R. & Haftka R. T. (1995). Improved genetic algorithm for minimum thickness composite laminate design. *Composites Engineering*, 5(2), 143–161.

doi:10.1016/0961-9526(95)90710-S.

Le Riche Rodolphe & Haftka R. T. (1993). Optimization of laminate stacking sequence for buckling load maximization by genetic algorithm. *AIAA Journal*, 31(5), 951–956. doi:10.2514/3.11710.

Leite P., Thomas M., Simon F. & Bréchet Y. (2014). *Optimal design of a multifunctional sandwich panel with foam core: Lightweight design for flexural stiffness and acoustical transmission loss.*

Leite P., Thomas M., Simon F. & Bréchet Y. (2015). Optimal design of a multifunctional sandwich panel with foam core: Lightweight design for flexural stiffness and acoustical transmission loss. *Advanced Engineering Materials*, 17(3), 311–318. doi:10.1002/adem.201400075.

Liao S. (2003). Knowledge management technologies and applications—literature review from 1995 to 2002. *Expert Systems with Applications*, 25(2), 155–164. doi:10.1016/S0957-4174(03)00043-5.

Masters I.G. & Evans K.E. (1996). Models for the elastic deformation of honeycombs. *Composite Structures*, 35(4), 403–422. doi:10.1016/S0263-8223(96)00054-2.

Minoux M. (1983). *Programmation mathématique: théorie et algorithmes* (Vol. 1). Dunod Paris.

Montemurro M. (2012). *Optimal design of advanced engineering modular systems through a new genetic approach.* Paris 6. <http://www.theses.fr/2012PA066588>.

Montemurro M., Koutsawa Y., Belouettar S., Vincenti A. & Vannucci P. (2012). Design of damping properties of hybrid laminates through a global optimisation strategy. *Composite Structures*, 94(11), 3309–3320. doi:10.1016/j.compstruct.2012.05.003.

Montemurro M., Vincenti A., & Vannucci P. (2012). A Two-Level Procedure for the Global Optimum Design of Composite Modular Structures—Application to the Design of an Aircraft Wing. *Journal of Optimization Theory and Applications*, 155(1), 24–53. doi:10.1007/s10957-012-0070-1.

Mottram J. & Taylor R. (1991). Thermal transport properties. *International encyclopedia of composites*, 5, 476–496.

Nagar A., Heragu S.S. & Haddock J. (1995). A meta-heuristic algorithm for a bi-criteria scheduling problem. *Annals of Operations Research*, 63, 397–414.

Nielsen L. E. (1974). The Thermal and Electrical Conductivity of Two-Phase Systems. *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*, 13(1), 17–20. doi:10.1021/i160049a004.

Pasini D. (2007). Shape transformers for material and shape selection of lightweight beams. *Materials & Design*, 28(7), 2071–2079. doi:10.1016/j.matdes.2006.05.028.

Pflug J. & Verpoest I. (2006). Sandwich Materials Selection Charts. *Journal of Sandwich Structures and Materials*, 8(5), 407–421. doi:10.1177/1099636206065521.

Popova N., Schaeffer C., Sarno C., Parbaud S. & Kapelski G. (2005). Thermal Management for Stacked 3D Microelectronic Packages. In *Power Electronics Specialists Conference, 2005. PESC '05. IEEE 36th* (pp. 1761–1766).

Puchinger J. & Raidl G.R. (2005). Combining Metaheuristics and Exact Algorithms in Combinatorial Optimization: A Survey and Classification. In J. Mira & J. R. Álvarez (Eds.), *Artificial Intelligence and Knowledge Engineering Applications: A Bioinspired Approach* (pp. 41–53).

Puchinger J., Raidl G.R. & Koller G. (2004). Solving a Real-World Glass Cutting Problem. In J. Gottlieb & G. R. Raidl (Eds.), *Evolutionary Computation in Combinatorial Optimization* (pp. 165–176).

Saint Martin X. (2005). Packaging des circuits intégrés. *Techniques de l'ingénieur Cartes électroniques: technologies et conception, base documentaire: TIB287DUO*.(ref. article : e3400).

Springer G.S. & Tsai S.W. (1967). Thermal Conductivities of Unidirectional Materials. *Journal of Composite Materials*, 1(2), 166–173. doi:10.1177/002199836700100206.

Talbi E.G. (2002). A Taxonomy of Hybrid Metaheuristics. *Journal of Heuristics*, 8(5), 541–564. doi:10.1023/A:1016540724870.

Teertstra P., Yovanovich M.M., Culham J. R. & Lemczyk T. (2001). Analytical forced convection modeling of plate fin heat sinks (pp. 34–41). doi:10.1109/STHERM.1999.762426.

Teghem J. (2012). *Recherche Opérationnelle Tome 1*. Ellipses.

Torquato S., Gibiansky L. V., Silva M. J., & Gibson L. J. (1998). Effective mechanical and transport properties of cellular solids. *International Journal of Mechanical*

Sciences, 40(1), 71–82. doi:10.1016/S0020-7403(97)00031-3.

Torquato S., Hyun S. & Donev A. (2002). Multifunctional Composites: Optimizing Microstructures for Simultaneous Transport of Heat and Electricity. *Physics*, 89. <http://physics.aps.org/focus-for/10.1103/PhysRevLett.89.266601>.

Trinh D.K. (2011). *Méthodes d'homogénéisation d'ordre supérieur pour les matériaux architecturés*. École Nationale Supérieure des Mines de Paris. Retrieved from <http://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00677046>.

Vincenti A., Ahmadian M.R. & Vannucci P. (2009). BIANCA: a genetic algorithm to solve hard combinatorial optimisation problems in engineering. *Journal of Global Optimization*, 48(3), 399–421. doi:10.1007/s10898-009-9503-2.

Voigt W. (1910). Lehrbuch der Krystallophysik. Berlin.

Wang J.F., Carson J.K., Willix J., North M.F. & Cleland D.J. (2008). A symmetric and interconnected skeleton structural (SISS) model for predicting thermal and electrical conductivity and Young's modulus of porous foams. *Acta Materialia*, 56(18), 5138–5146. doi:10.1016/j.actamat.2008.06.033.

Wargnier H. (2010). *Mémoire HDR*. Université Bordeaux.

Wargnier H., Castillo G., Danis M. & Bréchet Y. (2010). Study of the compatibility between criteria in a set of materials requirements: Application to a machine tool frame. *Materials & Design*, 31(2), 732–740. doi:10.1016/j.matdes.2009.08.003.

Wargnier H., Kromm F.X., Danis M. & Bréchet Y. (2014). Proposal for a multi-material design procedure. *Materials & Design*, 56, 44–49. doi:10.1016/j.matdes.2013.11.004.

Weaver P.M. & Ashby M.F. (1998). Material limits for shape efficiency. *Progress in Materials Science*, 41(12), 61–128. doi:10.1016/S0079-6425(97)10034-2

Wolpert D.H. & Macready W.G. (1997). No free lunch theorems for optimization. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 1(1), 67–82. doi:10.1109/4235.585893.

Ye H.Z. & Liu X.Y. (2004). Review of recent studies in magnesium matrix composites. *Journal of Materials Science*, 39(20), 6153–6171.

Yu X., Feng J., Feng Q. & Wang Q. (2005). Development of a plate-pin fin heat sink and its performance comparisons with a plate fin heat sink. *Applied Thermal*

Engineering, 25(2–3), 173–182. doi:10.1016/j.applthermaleng.2004.06.016.

Zupan M., Chen C. & Fleck N.A. (2003). The plastic collapse and energy absorption capacity of egg-box panels. *International Journal of Mechanical Sciences*, 45(5), 851–871. doi:10.1016/S0020-7403(03)00136-X.

ANNEXES

ANNEXE I : La base de données de matériaux

ANNEXE II : Modèles analytiques, paramètres géométriques et intervalles de validités associés à chacun des motifs géométriques contenus dans la base de données

ANNEXE III : Rappels sur les transferts thermiques

ANNEXE IV : Définition du génotype d'un individu

ANNEXE I : La base de données de matériaux

| Famille | Nom | Masse volumique (kg/m ³) | Coefficient de Poisson | Module de cisaillement (Pa) | Module d'Young (Pa) | Conductivité thermique longitudinale (W/m.K) | Conductivité thermique transverse (W/m.K) | Résistivité électrique longi (ohm.m) | Résistivité électrique transverse (ohm.m) | Chaleur spécifique (J/kg.K) |
|--|--|--------------------------------------|------------------------|-----------------------------|---------------------|--|---|--------------------------------------|---|-----------------------------|
| Métaux et alliages métalliques | Alliage d'aluminium A | 2.72E+03 | 3.30E-01 | 6.93E+10 | 2.67E+10 | 1.80E+02 | 1.80E+02 | 4.30E-08 | 4.30E-08 | 9.53E+02 |
| | Antimonial Lead Alloys | 1.05E+04 | 4.40E-01 | 2.20E+10 | 8.00E+09 | 2.80E+01 | 2.80E+01 | 2.48E-07 | 2.48E-07 | 1.46E+02 |
| | Carbon steel, AISI 1015 (normalised) | 7.85E+03 | 2.90E-01 | 2.10E+11 | 8.15E+10 | 5.20E+01 | 5.20E+01 | 1.70E-07 | 1.70E-07 | 4.85E+02 |
| | Cast aluminium alloy (A332.0) | 2.71E+03 | 3.40E-01 | 7.13E+10 | 2.66E+10 | 1.17E+02 | 1.17E+02 | 6.00E-08 | 6.00E-08 | 9.35E+02 |
| | Cast austenitic stainless steel (ASTM CG-8M) | 7.75E+03 | 2.70E-01 | 1.93E+11 | 7.60E+10 | 1.55E+01 | 1.55E+01 | 8.20E-07 | 8.20E-07 | 5.00E+02 |
| | Cast magnesium alloy (AM20) | 1.81E+03 | 3.05E-01 | 4.25E+10 | 1.54E+10 | 6.00E+01 | 6.00E+01 | 9.46E-08 | 9.46E-08 | 1.01E+03 |
| | Copper General Purpose | 8.94E+03 | 3.45E-01 | 1.27E+11 | 4.65E+10 | 2.59E+02 | 2.59E+02 | 3.36E-08 | 3.36E-08 | 3.80E+02 |
| | Iron, commercially pure "Ingot Iron", annealed | 7.87E+03 | 2.95E-01 | 2.08E+11 | 8.10E+10 | 7.55E+01 | 7.55E+01 | 1.09E-07 | 1.09E-07 | 4.50E+02 |
| | Low alloy steel, AISI 3140 (normalised) | 7.85E+03 | 2.90E-01 | 2.07E+11 | 8.00E+10 | 5.00E+01 | 5.00E+01 | 2.00E-07 | 2.00E-07 | 4.80E+02 |
| | Near-alpha titanium alloy (6-2-4-2) (a) | 4.54E+03 | 3.60E-01 | 1.14E+11 | 4.20E+10 | 6.00E+00 | 6.00E+00 | 1.91E-06 | 1.91E-06 | 5.10E+02 |
| | Nickel Beryllium Casting Alloy CR-1, as cast | 7.95E+03 | 3.00E-01 | 1.83E+11 | 7.25E+10 | 3.10E+01 | 3.10E+01 | 4.00E-07 | 4.00E-07 | 4.93E+02 |
| Tungsten-10% Copper alloy, "Elkonite 50W3" | 1.72E+04 | 2.80E-01 | 3.04E+11 | 1.18E+11 | 9.00E+01 | 9.00E+01 | 4.95E-08 | 4.95E-08 | 1.35E+02 | |

| | | | | | | | | | | |
|---------------------|---|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | Zinc-Aluminium General Casting Alloy, ZA-12 | 6.03E+03 | 3.02E-01 | 8.30E+10 | 3.20E+10 | 1.16E+02 | 1.16E+02 | 6.10E-08 | 6.10E-08 | 4.48E+02 |
| | Zinc-Copper-Titanium Pressure Die-Casting Alloy, "ILZRO 16" | 7,10E+03 | 2,50E-01 | 9,70E+10 | 4,00E+10 | 1,05E+02 | 1,05E+02 | 8,40E-08 | 8,40E-08 | 4.03E+02 |
| Céramiques | Silica Glasses | 2.20E+03 | 1.70E-01 | 7.06E+10 | 3.01E+10 | 1.45E+00 | 1.45E+00 | 5.00E+18 | 5.00E+18 | 7.05E+02 |
| | Silicon | 2.33E+03 | 2.70E-01 | 1.60E+11 | 6.15E+10 | 9.20E-01 | 9.20E-01 | 5.00E+01 | 5.00E+01 | 6.92E+02 |
| | Aluminas | 3.49E+03 | 2.70E-01 | 3.14E+11 | 1.27E+11 | 2.53E+01 | 2.53E+01 | 5.00E+15 | 5.00E+15 | 7.03E+02 |
| | Aluminium Nitrides | 3.13E+03 | 2.50E-01 | 3.25E+11 | 1.33E+11 | 6.00E+01 | 6.00E+01 | 5.00E+12 | 5.00E+12 | 8.00E+02 |
| | Silicon Carbides | 3.11E+03 | 2.00E-01 | 4.06E+11 | 1.75E+11 | 7.50E+01 | 7.50E+01 | 5.01E+02 | 5.01E+02 | 8.92E+02 |
| | Titanium Carbides | 4.91E+03 | 2.35E-01 | 4.35E+11 | 1.76E+11 | 2.15E+01 | 2.15E+01 | 2.15E-06 | 2.15E-06 | 5.57E+02 |
| | Tungsten Carbides | 1.56E+04 | 2.10E-01 | 6.43E+11 | 2.63E+11 | 5.80E+01 | 5.80E+01 | 7.08E-07 | 7.08E-07 | 2.38E+02 |
| | Concrete (Medium Density) | 2.40E+03 | 1.50E-01 | 2.15E+10 | 9.20E+09 | 1.65E+00 | 1.65E+00 | 2.51E+06 | 2.51E+06 | 1.01E+03 |
| | Granites | 2.63E+03 | 2.70E-01 | 6.15E+10 | 2.30E+10 | 2.85E+00 | 2.85E+00 | 1.61E+05 | 1.61E+05 | 8.50E+02 |
| Brick (Common Hard) | 2.19E+03 | 2.15E-01 | 4.50E+10 | 1.90E+10 | 9.00E-01 | 9.00E-01 | 5.00E+09 | 5.00E+09 | 6.75E+02 | |
| | Acrylic (PMMA) - General Purpose | 1.18E+03 | 4.15E-01 | 2.95E+09 | 9.50E+08 | 2.05E-01 | 2.05E-01 | 7.30E+13 | 7.30E+13 | 1.43E+03 |
| | Acrylobutadienestyrene (ABS) - Medium Impact | 1.05E+03 | 4.00E-01 | 2.70E+09 | 9.00E+08 | 1.70E-01 | 1.70E-01 | 1.00E+14 | 1.00E+14 | 1.51E+03 |
| | Cellulose Acetate (CA) | 1.30E+03 | 3.75E-01 | 1.95E+09 | 2.86E+09 | 2.45E-01 | 2.45E-01 | 3.25E+10 | 3.25E+10 | 1.47E+03 |
| | High density Polyethylene (HDPE) | 9.58E+02 | 4.10E-01 | 1.05E+09 | 3.80E+08 | 4.85E-01 | 4.85E-01 | 5.50E+15 | 5.50E+15 | 2.20E+03 |
| | Low Density Polyethylene (LDPE) | 9.20E+02 | 4.40E-01 | 1.75E+08 | 7.00E+07 | 3.20E-01 | 3.20E-01 | 5.05E+14 | 5.05E+14 | 2.03E+03 |
| | Nylon 11 (Polyamide, PA) | 1.04E+03 | 4.00E-01 | 9.25E+08 | 3.30E+08 | 2.70E-01 | 2.70E-01 | 9.46E+11 | 9.46E+11 | 1.68E+03 |

| | | | | | | | | | | |
|---------------------------|--|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Polymères | Poly TetraFluoro Ethylene (PTFE) | 2.14E+03 | 4.55E-01 | 5.00E+08 | 1.75E+08 | 2.20E-01 | 2.20E-01 | 5.50E+16 | 5.50E+16 | 1.01E+03 |
| | Polycarbonate (PC) | 1.21E+03 | 4.15E-01 | 2.45E+09 | 1.00E+09 | 1.80E-01 | 1.80E-01 | 5.05E+13 | 5.05E+13 | 1.21E+03 |
| | Polyether ether ketone (PEEK) | 1.31E+03 | 4.05E-01 | 3.80E+09 | 1.30E+09 | 2.45E-01 | 2.45E-01 | 3.66E+14 | 3.66E+14 | 1.55E+03 |
| | Polyethylene terephthalate (PET) | 1.35E+03 | 4.05E-01 | 2.85E+09 | 9.65E+08 | 2.45E-01 | 2.45E-01 | 5.50E+13 | 5.50E+13 | 1.50E+03 |
| | Polypropylenes (PP) | 9.05E+02 | 4.25E-01 | 1.30E+09 | 5.00E+08 | 1.70E-01 | 1.70E-01 | 5.05E+15 | 5.05E+15 | 1.88E+03 |
| | Polystyrene (PS) | 1.05E+03 | 4.15E-01 | 3.10E+09 | 1.10E+09 | 1.45E-01 | 1.45E-01 | 1.11E+14 | 1.11E+14 | 1.32E+03 |
| | Epoxy Resin (EP) - General Purpose | 1.20E+03 | 4.00E-01 | 3.15E+09 | 1.10E+09 | 3.40E-01 | 3.40E-01 | 5.50E+11 | 5.50E+11 | 1.83E+03 |
| | Polyester (PES) - casting / flexible | 1.15E+03 | 4.40E-01 | 4.50E+08 | 1.68E+08 | 1.75E-01 | 1.75E-01 | 5.50E+10 | 5.50E+10 | 1.24E+03 |
| | PolyUrethane (PU), flexible | 1.14E+03 | 4.94E-01 | 1.60E+07 | 4.35E+06 | 2.90E-01 | 2.90E-01 | 5.00E+13 | 5.00E+13 | 1.68E+03 |
| | Butyl Rubber, unfilled | 9.10E+02 | 4.99E-01 | 1.50E+06 | 4.50E+05 | 9.00E-02 | 9.00E-02 | 5.50E+07 | 5.50E+07 | 2.15E+03 |
| | Ethyl Vinyl Acetate (EVA) - 12% VA | 9.35E+02 | 4.80E-01 | 8.00E+07 | 2.75E+07 | 3.50E-01 | 3.50E-01 | 6.58E+13 | 6.58E+13 | 2.05E+03 |
| | Isoprene (IR) - unfilled | 9.35E+02 | 4.99E-01 | 1.85E+06 | 5.00E+05 | 1.10E-01 | 1.10E-01 | 5.50E+07 | 5.50E+07 | 2.15E+03 |
| | Natural Rubber (NR), unfilled | 9.25E+02 | 4.99E-01 | 2.00E+06 | 7.00E+05 | 1.20E-01 | 1.20E-01 | 5.50E+07 | 5.50E+07 | 2.15E+03 |
| | Polychloroprene (CR) Neoprene | 1.24E+03 | 4.88E-01 | 1.35E+06 | 3.60E+06 | 1.10E-01 | 1.10E-01 | 5.00E+14 | 5.00E+14 | 2.10E+03 |
| | PolyUrethane TPlastic Elastomer (PU) (a) | 1.14E+03 | 4.80E-01 | 7.75E+06 | 2.50E+06 | 2.95E-01 | 2.95E-01 | 6.58E+13 | 6.58E+13 | 1.68E+03 |
| Silicone (SIL) elastomers | 1.85E+03 | 4.70E-01 | 2.65E+07 | 1.05E+07 | 1.35E+00 | 1.35E+00 | 5.05E+13 | 5.05E+13 | 1.15E+03 | |
| Naturels | Bamboo | 7.00E+02 | 3.90E-01 | 1.75E+10 | 1.29E+09 | 1.70E-01 | 1.05E-01 | 1.30E+06 | 4.55E+06 | 1.69E+03 |
| | Cork | 7.00E+02 | 2.45E-01 | 1.08E+10 | 7.65E+08 | 1.40E-01 | 1.40E-01 | 3.80E+06 | 3.80E+06 | 1.69E+03 |

| | Wood | 6.50E+02 | 3.75E-01 | 1.39E+10 | 1.00E+09 | 3.25E-01 | 1.50E-01 | 3.56E+06 | 1.25E+07 | 1.69E+03 |
|------------|--|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Fibres | Beryllium (50-127 micron, f) | 1.86E+03 | 8.00E-02 | 3.07E+11 | 1.40E+11 | 1.85E+02 | 1.85E+01 | 4.50E-08 | 4.50E-09 | 1.86E+03 |
| | Tungsten (f) | 1.95E+04 | 2.70E-01 | 3.97E+11 | 1.70E+11 | 1.65E+02 | 1.65E+01 | 5.25E-08 | 5.25E-09 | 1.36E+02 |
| | Acier | 7.80E+03 | 1.50E-01 | 2.11E+11 | 8.11E+10 | 5.90E-08 | 5.90E-09 | 1.69E-07 | 1.69E-08 | 4.85E+02 |
| | Carbon HM fibers | 1.83E+03 | 1.05E-01 | 3.80E+11 | 1.70E+11 | 1.40E+02 | 1.40E+01 | 1.11E-03 | 1.11E-04 | 7.10E+02 |
| | Carbon UHM fibers | 2.02E+03 | 1.05E-01 | 7.60E+11 | 3.40E+11 | 1.40E+02 | 1.40E+01 | 5.01E-04 | 5.01E-05 | 7.10E+02 |
| | Carbon Pitch EWC 600X | 1.82E+03 | 1.05E-01 | 2.35E+11 | 1.05E+11 | 6.00E+02 | 6.00E+01 | 2.20E-06 | 2.20E-07 | 7.10E+02 |
| | Kevlar 149 aramid fiber | 1.47E+03 | 3.60E-01 | 1.80E+11 | 1.15E+09 | 3.00E-01 | 3.00E-02 | 5.05E+12 | 5.05E+11 | 1.40E+03 |
| | Glass, E grade (0.4-12 micron monofilament, f) | 2.58E+03 | 2.20E-01 | 7.85E+10 | 3.30E+10 | 1.28E+00 | 1.28E-01 | 1.50E+14 | 1.50E+13 | 8.03E+02 |
| | Borsic (SiC B S 100-150 micron, f) | 2.73E+03 | 2.10E-01 | 4.05E+11 | 1.58E+11 | 3.80E+01 | 3.80E+00 | 5.05E-04 | 5.05E-05 | 1.30E+03 |
| | Silicon carbide (140 micron, f) | 3.18E+03 | 1.45E-01 | 4.60E+11 | 2.00E+11 | 8.00E+01 | 8.00E+00 | 5.00E+01 | 5.00E+00 | 6.90E+02 |
| | Spectra 900 polyethylene fiber | 9.70E+02 | 4.20E-01 | 1.15E+11 | 3.50E+08 | 5.00E-01 | 5.00E-02 | 5.50E+15 | 5.50E+14 | 2.00E+03 |
| Flax | 1.49E+03 | 2.75E-01 | 5.70E+09 | 1.55E+09 | 2.50E-01 | 2.50E-02 | 1.00E+15 | 1.00E+14 | 1.21E+03 | |
| Particules | Alumina, particulate | 3.95E+03 | 2.65E-01 | 4.55E+11 | 1.80E+11 | 2.28E+01 | 2.28E+01 | 1.63E+12 | 1.63E+12 | 7.95E+02 |
| | Silicon carbide, particulate | 3.18E+00 | 1.45E-01 | 4.65E+11 | 2.05E+11 | 8.00E+01 | 8.00E+01 | 5.00E+01 | 5.00E+01 | 6.90E+02 |
| | Calcium carbonate, particulate | 2.68E+03 | 2.84E-01 | 3.05E+10 | 2.13E+10 | 2.68E+00 | 2.68E+00 | 2.04E+08 | 2.04E+08 | 1.80E-01 |

ANNEXE II : Modèles analytiques, paramètres géométriques et intervalles de validités associés à chacun des motifs géométriques contenus dans la base de données

Le tableau AII-1 récapitule l'ensemble des modèles d'homogénéisation analytiques sélectionnés pour évaluer les propriétés homogénéisées de chacun des motifs géométriques sélectionnés pour la construction de la base de données.

| Classe | Motifs géométriques | | Modèles utilisés |
|------------------------------------|---------------------|---|---|
| Motifs géométriques cellulaires | Mousses | cellules cubiques ouvertes | Gibson et Ashby [GIBSON, 1999] |
| | | cellules cubiques fermées | Ashby et Medalist [ASHBY, 1983] |
| | Treillis triangulé | | Ashby [ASHBY, 2006] |
| | Nidas | hexagonal régulier | Masters et al. [MASTERS, 1996] |
| | | carré | Hayes et al. [HAYES, 2004] |
| | | triangulaire | Torquato et al. [TORQUATO, 1998] |
| circulaire | | | |
| Empilements CFC de sphères creuses | | Gasser [GASSER, 2004] | |
| Motifs géométriques composites | Composites | fibres continues UD | Loi des mélanges [VOIGT, 1910] Springer et Tsai [SPRINGER, 1967] Berthelot [BERTHELOT, 2005] |
| | | fibres tissées | Berthelot [BERTHELOT, 2005] |
| | | fibres courtes orientées dans le volume | Hatta et Taya [HATTA, 1985] Chen et Cheng [CHEN, 1996] |
| | | fibres courtes orientées dans le plan | |
| | | fibres courtes alignées dans le plan | Lewis et Nielsen [NIELSEN, 1974] |
| | | renforts particuliers sphériques | |
| Motifs géométriques spécifiques | Picots | | Khan et al. [KHAN, 2008] |
| | Ailettes | | Teertstra et al. [TEERTSTRA, 2001] |

tableau AII-1 : Modèles analytiques utilisés dans l'évaluation des propriétés homogénéisées

Le tableau AII-2 récapitule l'ensemble des paramètres géométriques ainsi que les intervalles de validité associés à chaque modèle.

| Motifs géométriques | | Paramètres du modèle | Intervalle de validité |
|------------------------------------|---|---|---|
| Mousses | cellules cubiques ouvertes | t : épaisseur des bords de la cellule l : longueur du côté de la cellule ρ_r : densité relative de la cellule | $0 \leq \rho_r \leq 1$ |
| | cellules cubiques fermées | t_e : épaisseur des bords de la cellule t_r : épaisseur des parois de la cellule l : longueur du côté de la cellule ρ_r : densité relative de la cellule | $0,01 \leq \rho_r \leq 0,3$ |
| Treillis triangulé | | | $0 \leq \rho_r \leq 1$ |
| Nidas | hexagonal régulier | t : épaisseur des parois de la cellule l : longueur du côté de la cellule ρ_r : densité relative de la cellule | $0,01 \leq \rho_r \leq 0,3$ |
| | carré | | |
| | triangulaire | | |
| | circulaire | t : épaisseur des parois de la cellule R : rayon de la cellule ρ_r : densité relative de la cellule | $0,01 \leq \rho_r \leq 0,08$ |
| Empilements CFC de sphères creuses | | t : épaisseur des parois de la cellule R : rayon de la sphère r : rayon de contact entre 2 sphères ρ_r : densité relative de la cellule | $0,01 \leq \rho_r \leq 0,3$ |
| Composites | fibres continues UD | Fibre de section circulaire V_f : Fraction volumique de fibre | $V_f \leq 0,6$ |
| | fibres tissées | Fibre de section circulaire V_f : Fraction volumique de fibre $k = n_{chaîne} / (n_{chaîne} + n_{trame})$ | |
| | fibres courtes orientées dans le volume | V_f : Fraction volumique de fibre L : Longueur de la fibre D : Diamètre de la fibre | $V_f \leq 0,4$ |
| | fibres courtes orientées dans le plan | | $2 \leq \frac{L}{D} \leq 100$ |
| | fibres courtes alignées dans le plan | V_f : Fraction volumique de fibre L : Longueur de la fibre D : Diamètre de la fibre A : f (géométries du renfort) Φ_m : Paramètre lié à la dispersion du renfort | $V_f \leq 0,5$ $2 \leq \frac{L}{D} \leq 100$ |
| | renforts particuliers sphériques | V_p : Fraction volumique de particule A : dépend de la géométrie du renfort Φ_m : paramètre lié à la dispersion du renfort | $V_p \leq 0,5$ |
| Picots | | H : Hauteur du picot D : Diamètre du picot S_L : Espacement longitudinal S_T : Espacement transverse $\gamma = H/D$ | $Pr \geq 0,71$ $40 \leq Re_D \leq 1000$ $1,25 \leq \frac{S_L}{D}, \frac{S_T}{D} \leq 3$ $3 \leq \gamma \leq 8$ |

| | | |
|----------|---|-----------|
| Ailettes | H : Hauteur d'une ailette t : Epaisseur d'une ailette b : Espacement entre deux ailettes l : Longueur de l'ailette | $b \ll H$ |
|----------|---|-----------|

tableau AII-2 : Paramètres et intervalle de validité des modèles analytiques utilisés

ANNEXE III

Le capot supérieur du boîtier est soumis à nombreuses sollicitations thermiques durant toute la phase de fonctionnement du circuit électronique qu'il protège. Trois modes de transfert de chaleur existent, et tous sont identifiés dans l'environnement de l'application industrielle :

- les transferts thermiques par rayonnement ;
- les transferts thermiques par convection ;
- les transferts thermiques par conduction.

AIII.1 Les transferts thermiques par rayonnement

Tout corps à température différente de 0 Kelvin émet de l'énergie, sous forme d'un rayonnement d'ondes électromagnétiques. Plus la température du corps est élevée, plus le rayonnement est fort.

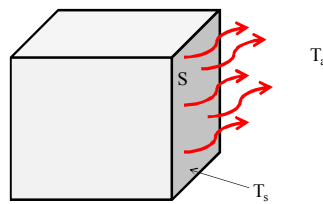


figure AIII-1 : Transfert thermique par rayonnement

La figure AIII-1 représente un solide dont une de ses faces S est maintenue à une température T_s . Si seule la surface S échange avec le milieu extérieur, alors le flux de chaleur échangé peut s'écrire à partir de la loi de Stephan exprimé par la relation (III-1) :

$$\phi = \varepsilon \cdot \sigma \cdot S (T_s^4 - T_a^4) \quad (\text{III-1})$$

avec ϕ : Flux de chaleur émis (W)

σ : Constante de Stephan-Boltzmann ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}^4$)

S : Surface d'échange (m^2)

ε : Coefficient d'émissivité (compris entre 0 et 1)

T_s : Température de la surface du corps (K)

T_a : Température ambiante (K)

AIII.2 Les transferts thermiques par conduction

La conduction thermique (figure AIII-2) est définie comme le mode de transfert de chaleur provoqué par la différence de température au sein d'un même milieu liquide, solide ou gazeux. La théorie de la conduction thermique est décrite par la loi de Fourier définissant en régime permanent la densité de flux proportionnelle au gradient de température :

$$\varphi = \frac{\phi}{S} = -\lambda \cdot \frac{dT}{dx} \quad (\text{III-2})$$

avec ϕ : Flux de chaleur émis (W)

φ : Densité de flux (W/m²)

S : Surface (m²)

λ : Conductivité thermique du matériau (W/m.K)

dT/dx : Gradient de température à travers le solide (K/m)

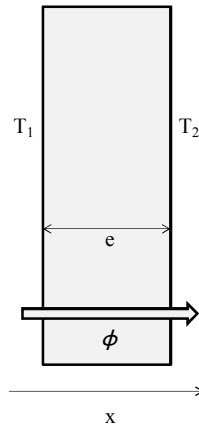


figure AIII-2 : Transfert thermique par conduction à travers un solide plan

AIII.3 Les transferts thermiques par convection

La convection thermique est le mode de transmission thermique impliquant le déplacement d'un fluide, liquide ou gazeux. Deux types de convection sont différenciés :

- la convection naturelle (ou libre) est provoquée par des différences de masses volumiques du milieu engendrée par des gradients de

températures ;

- la convection forcée se produit quand le mouvement du fluide est imposé par une intervention extérieure comme une ventilation.

Dans l'hypothèse d'une paroi P de température T_s soumise à flux d'air sur sa surface supérieure à la température ambiante T_a (figure AIII-3), la loi de Newton définit la densité de flux dissipée par convection par la paroi :

$$\varphi = h_c (T_s - T_a) \quad (\text{III-3})$$

avec φ : Densité de flux dissipée par convection (W/m^2)

h_c : Coefficient de convection ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$)

T_s : Température de la surface du solide (K)

T_a : Température ambiante (K)

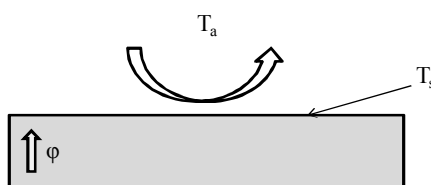


figure AIII-3 : Transfert thermique par convection

Dans le cas d'une surface plane, le coefficient de convection h_c ne dépend pas du matériau constitutif de la paroi mais uniquement des propriétés du fluide (viscosité, coefficient de dilatation thermique, densité) et de la nature de l'écoulement (laminaire ou turbulent).

Le calcul du coefficient de convection h_c fait intervenir le calcul du nombre de Nusselt. En convection forcée, le nombre de Nusselt est déterminé à partir des nombres de Reynolds et de Prandtl ($\text{Nu} = f(\text{Re}, \text{Pr})$) tandis qu'en convection naturelle, il est plutôt calculé à partir des nombres de Grashof et de Prandtl ($\text{Nu} = f(\text{Gr}, \text{Pr})$). Ces nombres, adimensionnés, sont définis tels que :

$$\text{Nombre de Nusselt} \quad Nu = \frac{h_c \cdot L}{\lambda} \quad (\text{III-4})$$

$$\text{Nombre de Reynolds} \quad Re = \frac{\rho \cdot v \cdot L}{\mu} \quad (\text{III-5})$$

$$\text{Nombre de Prandtl} \quad Pr = \frac{c_p \cdot \mu}{\lambda} \quad (\text{III-6})$$

$$\text{Nombre de Grashof} \quad Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot L^3 \cdot \rho^2}{\mu^2} \quad (\text{III-7})$$

avec c_p : Chaleur massique du fluide (J/Kg.K)

λ : Conductivité thermique du fluide (W/m.K)

v : Vitesse du fluide (m/s)

ρ : Masse volumique du fluide (kg/m³)

ΔT : Différence de température entre la paroi et le fluide ($T_s - T_a$)

β : Coefficient de dilatation thermique du fluide (K⁻¹)

μ : Viscosité dynamique du fluide (kg/m.s)

g : Accélération de la pesanteur (m/s²)

AIII.3 Notions de résistances thermiques

Les problèmes de conduction de chaleur peuvent être traités en effectuant une analogie avec la loi d'Ohm en électricité (figure AIII-4).

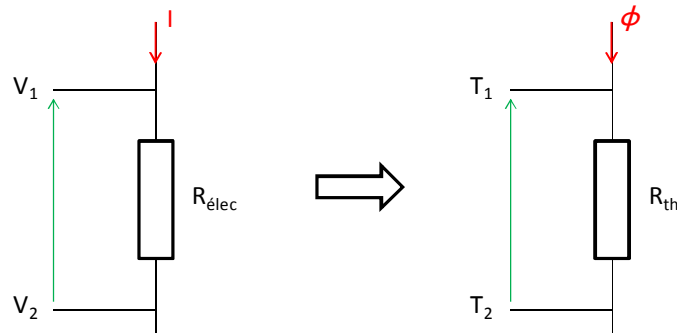


figure AIII-4 : Analogie entre conduction électrique et conduction thermique

Les paramètres électriques, comme la différence de potentiel et l'intensité sont ainsi respectivement identifiés à la différence de température et au flux de chaleur (tableau AIII-1).

| Phénomène physique | Grandeurs physiques | | |
|--------------------|------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|
| | Thermique | Flux de chaleur Φ | Différence de température Δt |
| Electrique | Intensité du courant I | Différence de potentiel ΔV | Résistance électrique R_{elec} |

tableau AIII-1 : Analogie entre grandeurs électriques et grandeurs physiques

A partir de la loi d'Ohm, il est possible d'exprimer la résistance électrique R_{elec} (Ω) en fonction de l'intensité de courant I (exprimée en ampères) et de la différence de potentiel ΔV :

$$R_{elec} = \frac{\Delta V}{I} = \frac{V_1 - V_2}{I} \quad (\text{III-8})$$

Par analogie, une relation entre la résistance thermique R_{th} formulée en fonction de la différence de température (exprimée en kelvin) et le flux de chaleur (exprimé en W) peut être exprimée de la forme :

$$R_{th} = \frac{T_1 - T_2}{\phi} \quad (\text{III-9})$$

Dans le cas d'une conduction 1D et d'un mur plan d'épaisseur e et de section S (figure 2), la résistance thermique peut s'écrire par la relation :

$$R_{th} = \frac{e}{\lambda.S} \quad (\text{III-10})$$

Dans ce travail, un formalisme similaire sera adopté lors de l'écriture de la résistance thermique équivalente associée au phénomène de convection notée $R_{convection}$:

$$R_{convection} = \frac{1}{h_c.S} \quad (\text{III-11})$$

ANNEXE IV : Définition du génotype d'un individu

Le travail développé dans ce manuscrit s'est porté sur l'optimisation d'un multimatériau bicouche plan. Selon le formalisme adopté, un multimatériau bicouche est composé de deux chromosomes (correspondant au nombre de couches). A chaque chromosome sont associés des gènes, chaque gène représentant une variable de conception du problème (figure AIV-1).

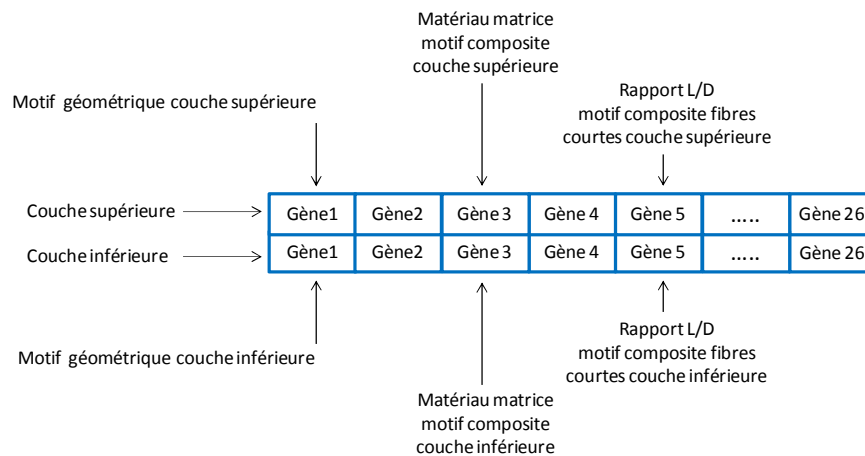


figure AIV -1 : Structuration d'un individu

Il est important de noter que chaque chromosome d'un individu est exactement défini par un génotype identique. Dans ce travail, chacun des chromosomes de l'individu est défini par 26 gènes. Le tableau AIV-1 explicite l'ensemble du génotype établi lors de la construction de l'individu considéré dans notre problème d'optimisation.

| Nom | Définition | Motif(s) concerné(s) |
|---------------|------------------------|---|
| ID_ply | Motif de la couche | Tous |
| Mat_1 | Matériau | Monolithique Composites (matrice) |
| Mat_2 | Matériau | Composite à renforts fibreux (renfort) |
| Mat_3 | Matériau | Composite à renforts particuliers (renfort) |
| e_1 | Epaisseur de la couche | Monolithique Composite à renforts fibreux |
| e_2 | Epaisseur de la couche | Composites à renforts UD |
| e_3 | Epaisseur de la couche | Composites à renforts tissés |
| e_4 | Epaisseur de la couche | Mousses |
| e_5 | Epaisseur de la couche | Composites à renforts fibres courtes Composite à renforts particuliers |
| Vf | Fraction volumique | Composites |
| ρ_{r_1} | Densité relative | Mousses à cellules ouvertes Treillis triangulés |

| | | |
|----------------------|--|---|
| ρ_{r_2} | Densité relative | Mousses à cellules fermées Nidas |
| Φ_r | Rapport entre l'épaisseur de la paroi et l'épaisseur des bords de la cellule | Mousses à cellules fermées |
| r_R | Rapport du rayon de contact entre deux sphères et le rayon d'une sphère | Empilement de sphères creuses |
| t_R | Rapport l'épaisseur et le rayon d'une sphère | Empilement de sphères creuses |
| L_D | Rapport de la longueur sur le diamètre de la fibre courte | Composites à renforts fibres courtes |
| ϑ_1 | Orientation du pli | Composites à renforts UD |
| ϑ_2 | Orientation du pli | Composites à renforts tissés |
| ϑ_3 | Orientation du pli | Composites à renforts fibres courtes alignées |
| Δl | Rapport de l'espacement longitudinal sur le diamètre des picots | Picots |
| Δt | Rapport de l'espacement transverse sur le diamètre des picots | Picots |
| γ | Facteur de forme du picot (H/D) | Picots |
| D_{picot} | Diamètre du picot | Picots |
| H_{ailette} | Hauteur de l'ailette | Ailettes |
| t | Epaisseur de l'ailette | Ailettes |
| H/b | Rapport de l'épaisseur de l'ailette sur l'espacement entre deux ailettes | Ailettes |

tableau AIV -1 : Génotype d'un individu