

MASTER 2 DE MATHÉMATIQUES ET APPLICATIONS
PARCOURS : CALCUL SCIENTIFIQUE ET MATHÉMATIQUES DE L'INFORMATION

Mémoire de stage présenté par

Léonard GAUTHIER

leonard.gauthier@etu.unistra.fr

ÉTUDE D'UNE SOLUTION LOGICIELLE

POUR LE MAILLAGE ET LA SIMULATION
DE RÉSEAUX THERMIQUES NODAUX

19 août 2023

Stage encadré par

Alexis SANJAIME

Au sein de

THALES DMS FRANCE

THALES
Building a future we can all trust

Abstract

In the corporate world, optimizing project development processes is an important issue. This involves updating the software in use, or studying new software suites to replace current processes. For the meshing and simulation of PCBs using nodal thermal networks, a simplified process incorporating BETA CAE's ANSA and META software requires a proof of concept. The main objective of this study is to demonstrate the interest and capacity of this tool to be integrated into the current workflow of THALES DMS PCB thermal simulation.

In this report, software gateways are created to obtain the first results using this new process. They are associated with a GUI and a user manual to facilitate their use. The first step is to standardize Thales's internal electronic component data base in JEDEC's JEP30 format. To integrate ANSA into the process, it is necessary to create a Python code for importing nodal thermal networks. The imported data must be editable by the user in the software interface or through scripts. A new export to the solver Fluent allows the integration of component thermal networks and the initialization of environment variables.

Simulations on a unit test with simplified PCB, show results equivalent to those expected by analytical calculations and by following the current process. On a test incorporating several components, the results fall within a range of temperatures which depend on the accuracy of the reference mesh. This demonstrates the feasibility of replacing the current process with one incorporating BETA CAE's ANSA software.

Résumé

Dans le milieu de l'entreprise, l'optimisation des processus de développement de projet est un enjeu important. Elle passe par la mise à jour des logiciels utilisés ou par l'étude de nouvelles suites de logiciels remplaçant les processus actuels. Pour le maillage et la simulation de PCB avec l'utilisation de réseaux thermiques nodaux, un processus simplifié incorporant les logiciels ANSA et META de BETA CAE nécessite une étude de faisabilité. L'objectif de cette étude est de montrer l'intérêt et la capacité de cet outil à s'intégrer dans le secteur de la simulation thermique de cartes électroniques.

Dans ce rapport, des passerelles logicielles sont créées afin d'obtenir les premiers résultats de ce nouveau processus. Elles sont associées avec un GUI et un manuel utilisateur pour faciliter leur emploi. Il faut d'abord standardiser les données des composants électroniques internes à Thales au format JEP30 de l'organisme JEDEC. Pour intégrer le logiciel ANSA dans le processus, il est nécessaire de créer un code Python pour l'import des réseaux thermiques nodaux. Les informations ainsi importées doivent pouvoir être modifiées par l'utilisateur dans l'interface logiciel ou bien à travers des scripts. Un nouvel export vers le solveur Fluent permet d'intégrer les réseaux résistifs des composants ainsi que d'initialiser les variables d'environnement.

Des simulations thermiques, sur un test unitaire sans représentation détaillée du PCB, montrent des résultats équivalents à ceux attendus par calculs analytiques ainsi qu'en suivant le processus actuel. Sur un test incorporant plusieurs composants, les résultats se situent dans un intervalle de champs de températures qui dépendent de la précision du maillage de référence. Ceci montre la faisabilité du remplacement du processus actuel par un processus incorporant le logiciel ANSA de BETA CAE.

Table des matières

Abstract	i
Résumé	ii
Table des matières	iii
Table des figures	v
Liste des tableaux	vii
Remerciements	viii
1 Introduction	1
2 Présentation du lieu d'accueil	3
2.1 Histoire de Thales	3
2.2 THALES DMS France	4
2.3 Bureau d'Études d'Elancourt	5
3 Contexte du projet	7
3.1 Structure d'une carte électronique	7
3.1.1 Circuit Imprimé : Printed Circuit Board (PCB)	7
3.1.2 Composants électroniques	8
3.1.3 Limites physiques	10
3.2 Processus de simulation thermique de PCB	14
3.2.1 Préparation des PCB	14
3.2.2 Modélisation des composants	15
3.3 Étude de faisabilité	18
3.3.1 Processus actuel et irritants	18
3.3.2 Solution à évaluer	21
3.3.3 Objectif du stage	24
4 Standardisation des données	25
4.1 Base de données interne	25
4.1.1 Format xml	25
4.1.2 Formats propriétaires Thales	26
4.2 Format JEP30 selon JEDEC	27
4.2.1 Base universelle	27
4.2.2 Personnalisation pour correspondre aux besoins	27
4.2.3 Vérification visuelle et simulation	29

5 Ajouts de fonctionnalités dans ANSA	33
5.1 Import de réseaux dans ANSA	33
5.1.1 Difficultés de programmation et de scripting	33
5.1.2 Arborescence et séparation par composant	34
5.2 Export du maillage avec CTM	36
5.2.1 Fichier format .cas	36
5.2.2 Transfert des données des composants	37
6 Simulation numérique : champ de température d'une carte électronique	39
6.1 Choix du solveur : Fluent	39
6.1.1 Avantages	39
6.1.2 Inconvénients	40
6.1.3 Intégration au nouveau processus	40
6.2 Résultats	41
6.2.1 Simulation d'un seul composant	41
6.2.2 Simulation de la carte électronique refroidie par liquide	45
7 Conclusion	51
A Simulation de la carte électronique refroidie par air	53
B Bibliographie	57
Glossaire	59

Table des figures

2.1	Carte indiquant la présence de sites Thales DMS et leurs BL	4
2.2	Description de l'organisme : du plus large jusqu'à mon poste	5
3.1	Schéma d'un PCB 4 couches (source Altium)	8
3.2	Intérieur d'un composant électronique après avoir enlevé le capot (source [1]) . .	8
3.3	Image (source Intel) et graphique représentant un CPU	9
3.4	Coupe d'un composant BGA soudé sur un PCB	9
3.5	Éléments fournis par les autres équipes du BE à celle de Simulation	14
3.6	Comparaison maillage des pistes et Metal Fraction	15
3.7	Comparaison de différentes modélisations de composants	16
3.8	Exemple du réseau résistif d'un CTM	17
3.9	Modèle résistif représentant les dissipations thermiques d'un composant	17
3.10	Processus actuel avec les irritants labellisés	18
3.11	Exemple de maillage fournit par Icepak	20
3.12	Processus théorique avec les solutions logicielles de BETA	21
3.13	Type d'Élément Fini disponible dans ANSA (2D et 3D) (source Wikipédia)	22
3.14	Résultat de l'import du PCB dans ANSA grâce à l'IPC-2581	23
3.15	Metal Fraction calculé dans ANSA (TOP et BOTTOM)	23
3.16	Processus adapté pour le stage avec les solutions logiciels de BETA	24
4.1	Exemple de fichier .xml (JEP30) et son graphe associé	26
4.2	Fichiers à fournir à la macro de standardisation	27
4.3	Exemple d'objets définis par <i>PolygonalFace</i> et <i>InclinedFace</i>	28
4.4	Différences des champs thermiques entre les 2 types de réseaux sur un iso-maillage	29
4.5	Histogramme des différences de températures entre les 2 types de réseaux sur un iso-maillage	30
4.6	Graphique de la répartition des différences des T_j entre les réseaux Icepak et ceux au format JEP30	31
5.1	Interface à la disposition de l'utilisateur	34
5.2	Interface à la disposition de l'utilisateur	35
5.3	Comparaison maillage conforme et non-conforme	36
5.4	Exemple de fenêtre de GUI : export	37
5.5	Gestion des résistances entre 2 nœuds externes par la création d'un nœud fantome	38
6.1	Schéma du modèle théorique	41
6.2	Graphique des températures selon l'épaisseur (z) dans le modèle et leur structure	43
6.3	Coupe vertical et ses températures associées	43
6.4	Graphique des températures selon l'épaisseur (z) pour chaque processus	44
6.5	Coupe du maillage d'Icepak sur un composant	45
6.6	Champ de température simulé sur le maillage d'Icepak	46

6.7	Vue latérale du maillage d'ANSA	47
6.8	Champ de température simulé sur le maillage d'ANSA	47
6.9	Champ des différences de températures entre Icepak et ANSA	48
6.10	Coupe du nouveau maillage amélioré d'Icepak	48
6.11	Champ des différences de températures entre ANSA et le maillage à 50 microns d'Icepak	49
6.12	Champ des différences de températures entre le nouveau maillage Icepak et ANSA	49
A.1	Passage de l'air pour le refroidissement	53
A.2	Correlation entre champ de température et Metal Fraction sur la face TOP	54
A.3	Correlation entre champ de température et Metal Fraction sur la couche de masse	54
A.4	Comparaison entre vitesse de l'air et champ de température	55

Liste des tableaux

3.1	Conductivité thermique de différents matériaux [2]	11
3.2	Analogies entre la loi de Fourier et la loi d'Ohm [3]	11
3.3	Émissivité de différents matériaux [4]	13
6.1	Données du modèle théorique	41
6.2	Les températures aux frontières des matériaux	43

Remerciements

Je tiens à remercier mon responsable de stage, monsieur Alexis SANJAIME, pour sa bienveillance et sa disponibilité avant et pendant toute la durée du stage. Ainsi que Pedro et Killian qui ont suivi et épaulé ce stage à chaque étape.

Je remercie aussi THALES DMS France et toutes les équipes qui la composent; en particulier le Bureau d'Études d'Élancourt sous la gestion de Cyril.

Je remercie les personnes du groupe de nouvel arrivant chez Thales Élancourt qui s'est transformé en groupe d'amis : Loick, Laura, Pierrick, Margaux, Nicolas, Sébastien, Bérengère, etc.

Un remerciement à l'équipe de BETA, qui ont été sympathique et pédagogue sur l'utilisation de leurs logiciels.

Je remercie l'université de Strasbourg qui m'a donné la possibilité d'arriver où j'en suis. Je pense à tous mes professeurs de licence/maitrise qui m'ont enseigné, en particulier le responsable du master CSMI monsieur Christophe PRUD'HOMME. Je pense aussi à tous les amis fait au cours du chemin tel que : Aurélien, Victor, Toky, Céline, Benjamin, Marceau et son groupe d'amis, Fredérique, Melissa, Lucas, Claire, Javier, Congo, Kaisheng, Ikram.

Je remercie toute ma famille (Thierry, Maryannick, Ferréol, Léopoldine) pour le soutien bien que le cadet se décide à partir à 500km du foyer familial. Ils se sont notamment occupés de mon chat pendant mon absence. J'ai une pensée pour mes grand-mères Jeanne et Paulette qui m'ont soutenu tout le long de mes études.

Mention spéciale à Marie FRITZ qui a toujours été là en tant qu'amie, soutien et plein d'autres casquettes. Et qui, je l'espère, le restera pour très longtemps.

Chapitre 1

Introduction

Dans le cadre d'un master Calcul Scientifique et Mathématique de l'Information à l'université de Strasbourg, j'ai pu acquérir des connaissances dans 4 principaux domaines de compétences : Modélisation-Simulation-Optimisation, Traitement et fouille de données, Calcul haute performance ainsi que Traitement signal et image.

Afin de mettre en œuvre ces compétences dans le milieu d'entreprise, j'ai eu l'occasion de rejoindre les équipes de Thales DMS France pour une durée de 6 mois. Cette expérience se traduit par un stage autour de l'étude d'une solution logicielle, pour le maillage et la simulation de réseaux thermiques nodaux. Ce choix est conduit par mon envie de découvrir le travail dans une grande entreprise pionnière dans une multitude de domaines techniques.

Les tâches qui m'ont été confiées intègrent une importante part de programmation et sont plus applicatives que théoriques. Ce stage est en accord avec mon projet professionnel d'enrichir mes compétences dans les simulations numériques. Le domaine de la défense m'était peu familier et j'ai appris de nombreuses notions relatives à ce milieu. Il m'a permis de découvrir le fonctionnement de systèmes électroniques ainsi que les problématiques liées aux contraintes mécaniques et thermiques.

J'ai articulé ce mémoire en présentant tout d'abord le groupe Thales, les structures qui la composent et l'équipe que j'ai rejointe. J'introduis ensuite les notions et les termes en rapport aux cartes électroniques en partant de l'échelle du PCB, jusqu'à celle du composant en introduisant les limites physiques rencontrées. Ces contraintes justifient des modélisations et simulations. Actuellement un processus est utilisé mais présente quelques irritants. Pour les régler, une solution est à évaluer et nécessite le développement de nouvelles fonctionnalités. C'est dans ce contexte que s'inscrit mon stage.

Cette solution se compose en 3 étapes dépendantes les unes des autres. Il faut d'abord une standardisation de certaines données dans des formats qui ont été créés pour répondre aux besoins de modélisation de cartes électroniques. Cette mise au format consiste à produire un code Python qu'il faut valider par la suite. À partir de là, il est possible d'introduire le logiciel sur lequel cette solution s'articule, ainsi que les 2 passerelles permettant d'importer et d'exporter des informations. Pour finir, il reste à présenter les résultats de simulation et les comparer avec ceux obtenus par le solveur actuel.

Chapitre 2

Présentation du lieu d'accueil

Pour présenter la structure qui m'a accueilli pour ce stage, je commencerai par un résumé de l'historique du groupe Thales. Ensuite, je me concentrerai sur la filiale THALES DMS à laquelle je suis rattaché et sa place dans le contexte global du groupe. Et pour finir, je parlerai de l'équipe que j'ai intégrée et les missions qui lui sont assignées.

2.1 Histoire de Thales

L'origine du groupe Thales remonte en 1968 lors de la naissance de Thomson-CSF par la fusion de la Compagnie Générale de Télégraphie Sans Fil (C.S.F) et des activités d'électronique de Thomson-Brandt. L'activité du groupe à cette époque est ciblée sur la radio, télévision, communication et radar. Dans les années 80, il est décidé de centrer l'activité sur l'électronique professionnelle et de défense. Pendant les 20 années suivantes, l'entreprise élargit sa clientèle à l'Europe et fait l'acquisition d'entreprises spécialisées dans l'aviation et le spatial.

Dans les années 2000, le groupe Thomson CSF atteint une renommée mondiale et décide de diversifier ses activités. Pour suivre cette croissance, il est décidé de réorganiser la compagnie en 3 pôles autour de la défense, de l'aéronautique et des Technologies de l'Information et des Services (IT&S). A cette occasion, Thomson-CSF se renomme Thales et depuis l'entreprise ne cesse de croître dans le domaine de la défense pour arriver à ce qu'elle est aujourd'hui.

Thales emploie, à ce jour, plus de 77000 collaborateurs avec une présence mondiale dans 68 pays. En 2022, son chiffre d'affaires s'élevait à 17,6 milliards d'euros dont 1 milliard a été ré-injecté dans la R&D¹. Son siège social est situé à la Défense à Paris et le directeur exécutif est monsieur Patrice CAINE.

1. Recherche et Développement

2.2 THALES DMS France

Thales est une entreprise regroupant plusieurs domaines d'activité répartis en 7 GBU². Chacune de ces GBU constitue une entité Thales propre.

- Avionique (AVS)
- Espace (TAS)
- Identité et sécurité numériques (DIS)
- Systèmes de mission de défense (DMS)
- Systèmes terrestres et aériens (LAS)
- Systèmes d'information et de communication sécurisés (SIX)
- Systèmes de transport terrestre (GTS)

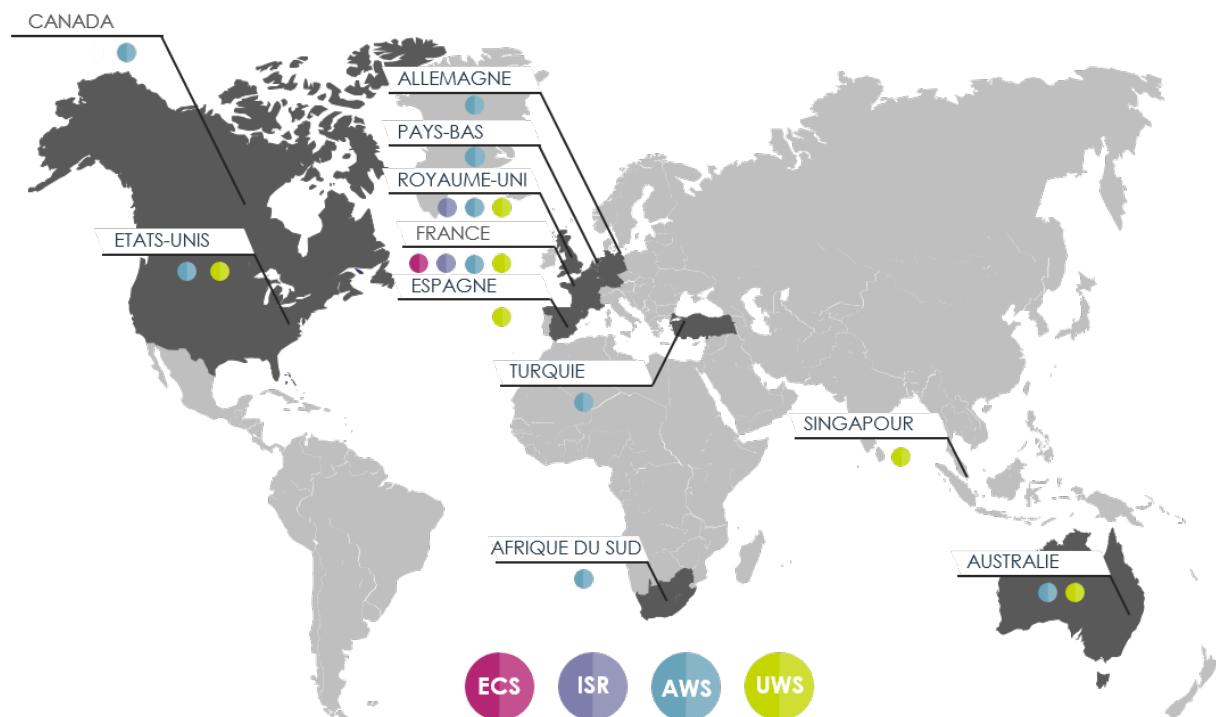


FIGURE 2.1 – Carte indiquant la présence de sites Thales DMS et leurs BL

La GBU THALES DMS comprend 9000 collaborateurs et est principalement implantée dans 4 pays (cf figure 2.1) : France, Royaume-Uni, Pays-Bas et Australie qui sont aussi les principaux clients. Ces activités sont concentrées dans les secteurs navals et aériens de défense et correspondent à 2,8 milliards de chiffre d'affaires en 2021.

Elles couvrent les systèmes de combat, les systèmes de senseurs et les services pour des navires de combats, des aéronefs de chasse ou de surveillance, ainsi que des drones. Ces activités sont divisées en 4 Business Line (BL) :

- Systèmes Navires de Surface (AWS)
- Systèmes de Combat Electroniques (ECS)
- Intelligence, Surveillance, Reconnaissance (ISR)
- Systèmes Sous-Marins (UWS)

2. Global Business Unit

THALES DMS France répartit ses activités de recherches et de productions sur 6 sites regroupant 4900 personnes. Le siège est sur le site d'Élancourt où 1100 personnes travaillent principalement sur la R&D des radars de combat, des systèmes de Guerre Electronique aéroportés ou des systèmes de mission et de surveillance (avions et satellites). La particularité de ce site est qu'il partage ses locaux avec d'autres GBU comme THALES LAS.

2.3 Bureau d'Études d'Élancourt

Le Bureau d'Études (BE) d'Élancourt, rattaché aux BL ECS et ISR, s'inscrit dans le Centre de Compétence Ingénierie Matériel (CC IM) et plus précisément dans le département Radar & Espace. Le BE se compose d'une trentaine de collaborateurs et se divise en quatre équipes qui travaillent en étroite collaboration :

- L'équipe Mécanique définit l'environnement mécanique du matériel, comme les contraintes de volume, de poids et de maintien sur le porteur (radar, coffret, carte, ...). Ce sont eux qui décident des spécifications dues à la mise en boîtier ou l'emplacement des fixations.
- L'équipe Circuit Imprimé permet de passer d'une conception théorique vers une conception physique en réalisant l'implantation et le routage des cartes électroniques.
- L'équipe d'études Simulations Thermiques et Mécaniques contrôle la tenue du matériel dans son environnement. Ils sont en charge d'analyser la tenue thermique et mécanique des éléments constituant le système mis en œuvre (carte électronique, coffret, ...). Elle participe également à la mise au point de nouveaux concepts mécaniques (méthodes de maintien d'un composant) et thermiques (processus ou matériaux afin de faciliter la dissipation thermique). C'est au sein de cet effectif que ce stage prend place et que j'ai rejoint sous la tutelle de mon maître de stage (cf figure 2.2).
- L'équipe Intégration, Vérification, Validation et Qualification (IVVQ) consiste à caractériser, planifier et réaliser une stratégie de validation du design et la qualification des projets menés au Bureau d'études. Cela se traduit par la spécification de test afin de pouvoir évaluer objectivement la conformité des projets. Ces différents essais sont réalisés dans les laboratoires d'analyses (mécanique et thermique) rattachés au BE d'Élancourt.



FIGURE 2.2 – Description de l'organisme : du plus large jusqu'à mon poste

Chapitre 3

Contexte du projet

Le BE¹ est en charge de la conception de systèmes composés de cartes électroniques (puissance, numérique et hyperfréquence). Afin de comprendre le processus de création d'une carte électronique étape par étape, il faut décrire ce qui la compose et les difficultés liées. Cela entraîne un cycle de vie de cette carte à travers les différentes équipes. Ces passages durent plus ou moins longtemps selon la complexité demandée et la présence ou non de faits techniques.

3.1 Structure d'une carte électronique

Les cartes électroniques sont constituées d'un PCB² qui sert de support mécanique[5] et de composants électriques qui y sont attachés dans le but d'exécuter une tâche précise. Elles se retrouvent dans la vie de tous les jours, car nécessaires pour tout produit ayant une partie électronique (téléphone, ordinateur, ...).

3.1.1 Circuit Imprimé : Printed Circuit Board (PCB)

Un PCB est composé d'un assemblage de couches de cuivre organisées en pistes séparées par un matériau diélectrique³ (par exemple de la résine associée à de la fibre de verre). Ces pistes servent à alimenter ou faire communiquer les composants entre eux. Il est généralement rigide, mais existe aussi en flexible (grâce à une résine "flexible"). La conception d'un PCB est choisie selon les fonctions qui lui sont attribuées, les contraintes thermiques et climatiques de l'équipement, l'encombrement du système ainsi que son prix.

Il peut être composé d'une seule couche, il est alors appelé *simple face*. Les composants sont rapportés sur une seule face appelée TOP. S'il est composé de 2 couches, il lui est rajouté une face verso dite BOTTOM. Dès que le nombre de couches est supérieur à 2, le PCB est dit *multicouche* et intègre des couches dites internes. Les différentes couches du PCB peuvent communiquer et transférer des signaux entre elles grâce à des vias (trous métallisés) qui peuvent être traversant, enterré, borgne, etc (cf figure 3.1).

Pour le processus de fabrication, chaque couche est créée individuellement puis assemblée pour former le PCB final.

-
1. Bureau d'Études
 2. *Printed Circuit Board* (Circuit Imprimé)
 3. Matériau isolant pouvant être polarisé par un champ électrique

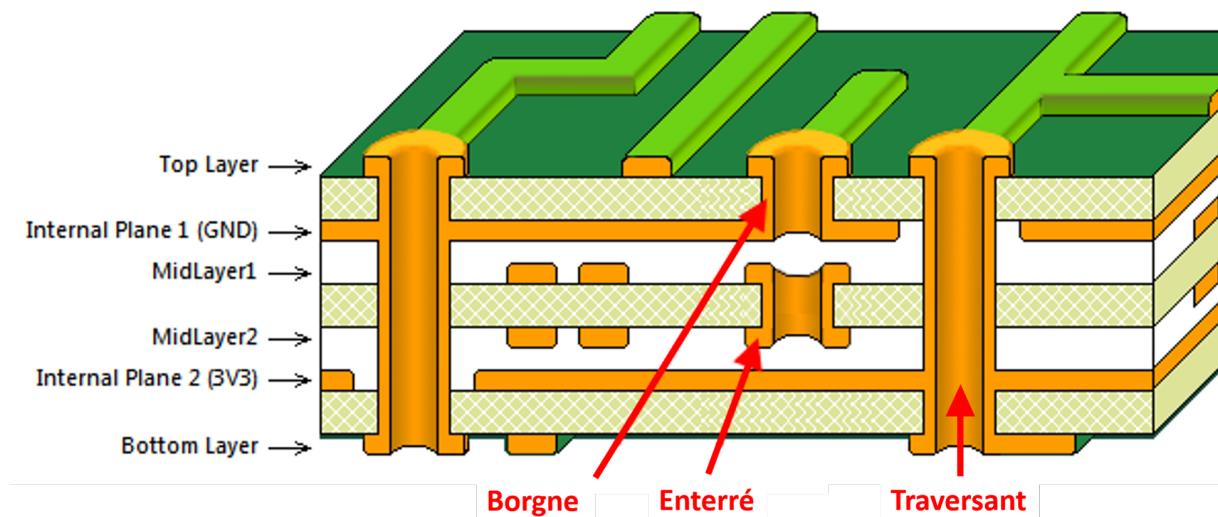


FIGURE 3.1 – Schéma d'un PCB 4 couches (source Altium)

Par exemple, la plupart des cartes mère des ordinateurs sont constituées de 4 couches et les smartphones possèdent, peu ou prou, une dizaine. Au sein de Thales DMS, certaines cartes peuvent dépasser la vingtaine de couches. Dues aux contraintes d'encombrement et de poids des systèmes aéroportés, les PCB regroupent de nombreuses fonctions comme le numérique, l'alimentation et l'hyperfréquence. Les cartes se densifient et leur complexité augmente.

3.1.2 Composants électroniques

Un composant permet d'effectuer une ou plusieurs tâches, elle peut être simple comme manipuler la puissance électrique (transistor, résistance, ...) ou plus complexe comme exécuter des instructions machine (microprocesseur).

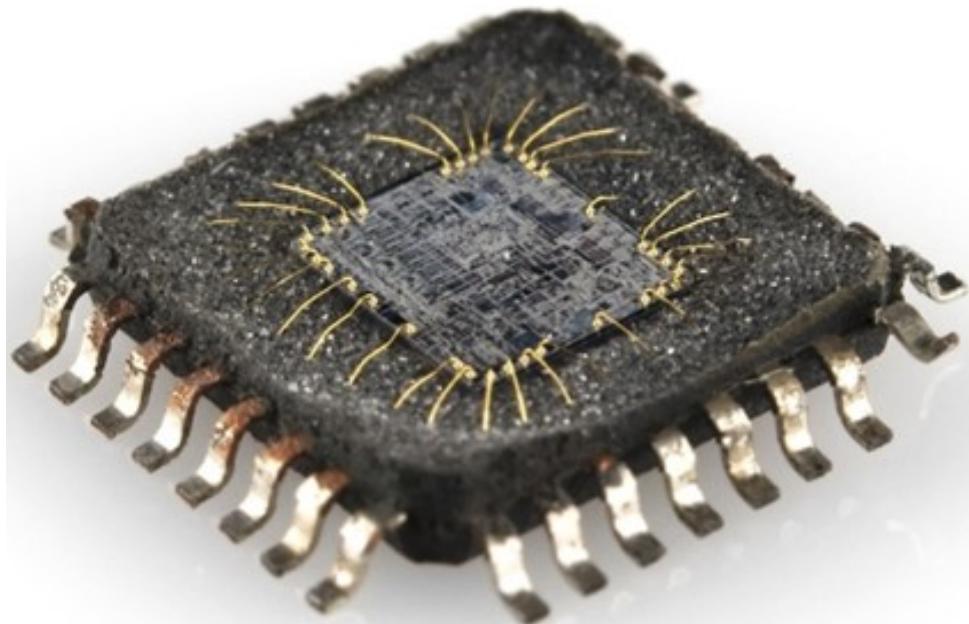


FIGURE 3.2 – Intérieur d'un composant électronique après avoir enlevé le capot (source [1])

Sur les composants les plus simples, les puces sont encapsulées dans un boîtier de résine (cf figure 3.2). Cela permet de les protéger de la manipulation ainsi que de l'environnement qui les entoure : humidité, poussière, etc.

Dans le cas des CPU⁴ qui équipent les cartes mères des ordinateurs, la température générée par les puces nécessite la présence d'un capot en cuivre permettant d'évacuer la chaleur par conduction (cf figure 3.3).



FIGURE 3.3 – Image (source Intel) et graphique représentant un CPU

Il existe des composants spécifiques tel que le BGA⁵ présent en figure 3.4, reconnaissable par la connexion qui le relie au PCB composée d'une matrice de billes de soudure (cf figure 3.4 : zone 2). Ce BGA est fabriqué par un empilage de couches similaires à un PCB et accueille plusieurs puces placées dans des cavités. Il est observable que les parois du boîtier n'ont pas la même épaisseur ou empilage de matériaux.



FIGURE 3.4 – Coupe d'un composant BGA soudé sur un PCB

4. Processeur

5. boîtier à matrice de billes

La base est multi-couche et possède une épaisseur conséquente ; elle est traversée par des vias pleins reliés aux billes (cf figure 3.4 : zone 2).

Les côtés (appelés BACK) sont principalement composés de diélectrique (zone 1) qui va isoler et structurer les cavités des puces. Ils sont traversés par des vias pleins permettant une communication entre le TOP et le BOTTOM du boîtier.

Le dessus est d'épaisseur plus faible que la base mais reste multi-couche, comprenant notamment une couche de cuivre, toujours traversée par des vias pleins (zone 3). Cette couche de cuivre sur la face supérieure (TOP) du composant permet d'améliorer l'évacuation de la puissance dissipée dans les puces.

La complexité interne des composants (de par leur forme et différences de matériaux) crée des chemins de transfert de chaleur unique à chacun. Pour les composants à forte densité de puissance, il est important de réduire les résistances thermiques entre les zones de puissances et les faces externes du boîtier pour dissiper efficacement la chaleur.

3.1.3 Limites physiques

Lors du fonctionnement de composants électroniques, un phénomène de dissipation de puissance au niveau des transistors va générer de la chaleur. Cela peut réduire les performances voire causer des défaillances, si les limites du domaine de fonctionnement sont atteintes. D'après la loi d'Arrhenius [6], le taux de défaillance (λ_{TD}) d'un composant électronique augmente exponentiellement avec la température du point le plus chaud. Ce point le plus chaud se trouve au niveau des transistors et la température associée est appelée température de Jonction (T_j). Cette loi calcule un facteur de vieillissement par rapport à une utilisation à température recommandée :

$$\lambda_{TD} = \exp \left(\frac{E}{k_B} \left(\frac{1}{T_j^{ref}} - \frac{1}{T_j^{obs}} \right) \right) \quad (3.1)$$

avec :

- E : énergie d'activation (eV)
- k_B : constante de Boltzman (eV·K⁻¹)
- T_j^{ref} : température de Jonction (T_j) recommandé (K)
- T_j^{obs} : T_j observée (K)

Généralement, un système électronique militaire doit être capable de fonctionner entre -55 et 125 °C qu'importe l'environnement qui l'entoure et en impactant le moins possible ces performances. Le but est donc d'atteindre une température de fonctionnement stationnaire et dépendant le moins possible de son environnement.

Avant d'atteindre un état d'équilibre thermique, il y a des transferts thermiques entre les différentes sources de température. Il existe 3 types de transfert de chaleur : conduction, convection et rayonnement.

La conduction :

La conduction est le processus de propagation de la chaleur par contact direct, entre les particules au sein d'un corps ou entre différents corps, dès qu'il existe un gradient de température. Le flux conductif Φ (W) entre deux sources connectées par une surface S (m^2) et distantes de L (m) est donné par la loi de Fourier [2] :

$$\Phi = \lambda \frac{S}{L} \Delta T \quad (3.2)$$

avec :

- ΔT : écart de température entre les deux sources (K)
- λ : conductivité thermique liée aux matériaux ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)

Cette conductivité thermique caractérise la propriété d'un corps à transmettre la chaleur. Généralement, les bons conducteurs thermiques sont aussi bons conducteurs électriques (cf tableau 3.1). Pour un PCBA, les échanges de chaleur entre un composant et le PCB sont caractérisés par un échange conductif.

TABLE 3.1 – Conductivité thermique de différents matériaux [2]

Matériaux	λ ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)	Matériaux	λ ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)
Métaux et alliages :		Isolants :	
Acier Inox 321	14.5	Air	0.03
Acier Inox 410	24	Époxy	0.20
Aluminium	216.5	Époxy conducteur thermique	0.80
Argent	417.5	Silicone	0.20
Cuivre	394	Verre	0.80
Diamant	630	Semi-conducteur :	
Étain	63	Silicium pur	145.5
Or	291.5		

La loi de Fourier peut être considérée comme analogue à la loi d'Ohm :

$$\Delta V = R \cdot I \quad (3.3)$$

avec :

- ΔV : tension (V)
- R : valeur de résistance (Ω)
- I : intensité du courant (A)

TABLE 3.2 – Analogies entre la loi de Fourier et la loi d'Ohm [3]

Thermique	Électricité		
Loi de Fourier	$\Delta T = R_T \cdot \Phi$	\Leftrightarrow	$\Delta V = R \cdot I$
Conductivité thermique	$\lambda(T)$	\Leftrightarrow	$\sigma(T)$
Température	T	\Leftrightarrow	V
Flux thermique	Φ	\Leftrightarrow	I
Résistance thermique	$R_T = L/\lambda S$	\Leftrightarrow	R

La convection :

Le phénomène de convection se réfère au transfert thermique qui a lieu dans les fluides liquides ou gazeux en mouvement. La convection est le processus de transfert thermique déterminé par le mouvement des particules d'un fluide entre des zones ayant des températures différentes. [4]

Deux types de convection se distinguent suivant la cause du mouvement :

- la convection naturelle originaire du mouvement produit par les différences de densité entre les particules chaudes et celles qui sont froides existant dans un fluide.
- la convection forcée lorsque le mouvement est dû à une action externe : ventilateur, pompe, ...

Un problème de convection est régi par les équations de conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie.

Le flux thermique est relié à l'écart de température caractéristique de l'échange thermique paroi-fluide par la relation de Newton :

$$\Phi = hS(T_p - T_f) \quad (3.4)$$

avec :

- Φ : flux thermique (W)
- h : coefficient de convection ($\text{W}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$)
- S : surface de contact (m^2)
- T_p : température de la paroi (K)
- T_f : température du fluide au loin (convection externe) ou température de mélange du fluide (convection interne) (K)

La détermination du coefficient h passe par le calcul du nombre de Nusselt Nu :

$$\text{convection naturelle} : Nu = f(Gr_{L_c}, Pr) \quad \text{convection forcée} : Nu = f(Re, Pr) \quad (3.5)$$

Ce nombre dépend :

- des propriétés thermiques du fluide, caractérisées par le nombre de Prandtl Pr .
- de l'écoulement du fluide (laminaire ou turbulent) caractérisé par le nombre de Reynolds Re pour la convection forcée et sinon le nombre de Grashof Gr pour la convection naturelle.

$$Nu = \frac{hL}{\lambda} \quad Pr = \frac{\mu C_p}{\lambda} \quad Re = \frac{\rho VL}{\mu} \quad Gr = \frac{g \beta \Delta T L^3 \rho^2}{\mu^2} \quad (3.6)$$

avec :

- h : coefficient de convection ($\text{W}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$)
- L : longueur caractéristique (m)
- λ : conductivité thermique ($\text{W}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$)
- ρ : masse volumique du fluide ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
- V : vitesse du fluide ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
- μ : viscosité dynamique du fluide ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$)
- C_p : capacité thermique massique ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)
- g : accélération de la pesanteur ($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)
- β : coefficient de dilatation (K^{-1})
- ΔT : différence de température entre la paroi et le fluide au repos (K)

Le rayonnement :

Le rayonnement caractérise la transmission d'énergie impliquant une onde électromagnétique entre 2 corps. En considérant un cas simplifié, le flux thermique émis peut être calculé par :

$$\Phi = \varepsilon \sigma S (T_s^4 - T_a^4) \quad (3.7)$$

avec :

- Φ : flux thermique (W)
- ε : facteur d'émission de la surface
- σ : constante de Stéphan Boltzmann $5,67 \cdot 10^{-8}$ (W·K $^{-4}$ ·m $^{-2}$)
- S : surface d'échange (m 2)
- T_s : température de la surface (K)
- T_a : température ambiante (K)

Ce transfert dépend de l'émissivité du matériau et de la surface du corps le plus chaud. Plus l'émissivité est proche de 1, plus le matériau émet de l'énergie. Par exemple, un métal poli émettra peu d'énergie comparé à un métal oxydé ou anodisé (cf tableau 3.3).

TABLE 3.3 – Émissivité de différents matériaux [4]

Matériaux	ε	Matériaux	ε
Métaux :		Non-Métaux :	
Acier Inox poli	0.16	Eau	0.95 - 0.96
Acier Inox oxydé	0.74 - 0.87	Neige	0.96 - 1.00
Aluminium poli	0.04 - 0.06	Céramique	0.90 - 0.94
Aluminium anodisé	0.55	Vernis	0.90
Cuivre poli	0.02 - 0.05	Peinture d'aluminium	0.27 - 0.67
Cuivre oxydé	0.85	Verre	0.80 - 0.95
Argent/Or poli	0.02	Peau humaine	0.98

Pour être significatif, le rayonnement nécessite une surface d'échange importante ou une différence de température entre les deux corps importante. Dans ce stage, la plupart des objets sont à l'échelle du centimètre voire du millimètre. Le rayonnement est donc considéré négligeable par rapport à la conduction et convection.

3.2 Processus de simulation thermique de PCB

Les exigences de performances attendues pour les systèmes Thales nécessitent de prendre en compte l'évacuation de la puissance dissipée dans les composants dès la conception des PCB. Le BE SIMU intervient alors pour estimer et attester que la carte électronique répond aux exigences demandées. Des aides logicielles, sont à disposition afin de faciliter les simulations des cartes qui sont souvent complexes, avec des densités de puissances importantes et dans un environnement contraint.

3.2.1 Préparation des PCB

La première étape de préparation des PCBA⁶ pour la simulation thermique, consiste à récupérer le dossier de définition auprès du BE CI. Le dossier est importé dans un logiciel interne Thales, permettant de récupérer les informations du PCB (couches, routages, vias) ainsi que les informations des composants (positions, taille, propriétés thermiques) dans une base de données internes (cf figure 3.5). Plusieurs méthodes de modélisations sont possibles pour les composants, notamment une approche par modèles thermiques réduits (réseau RC, voir paragraphe 3.2.2).

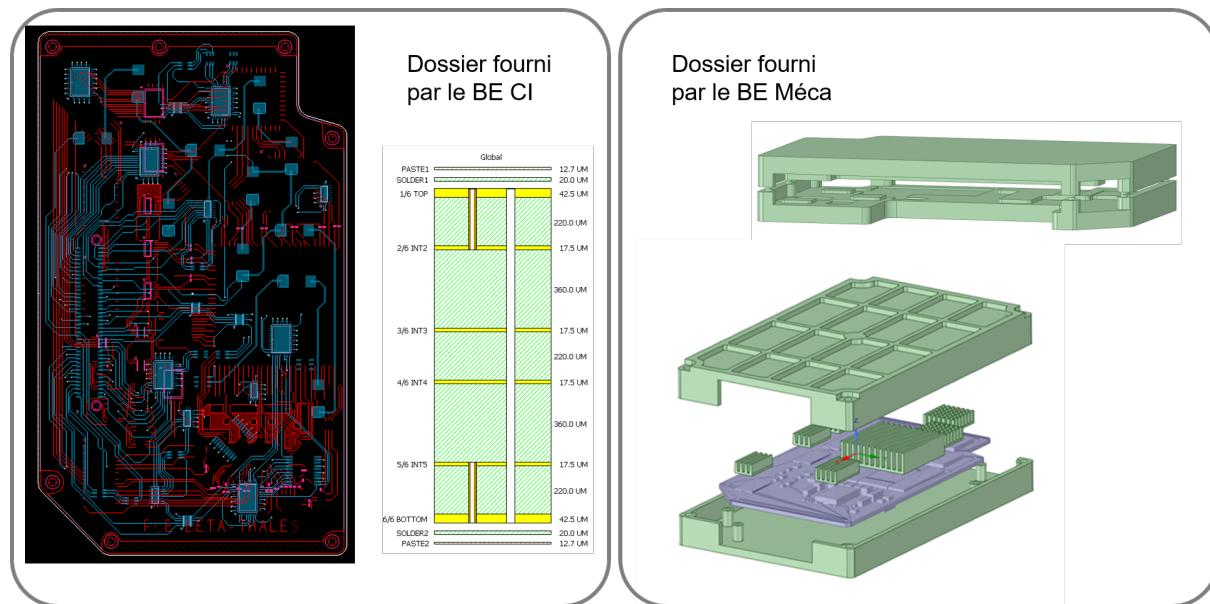


FIGURE 3.5 – Éléments fournis par les autres équipes du BE à celle de Simulation

Une fois les informations récupérées, il est possible d'exporter le PCB dans un format compatible avec les outils de simulation thermique. Dans le processus actuel THALES DMS (cf figure 3.10), le PCB est exporté vers le logiciel Icepak de la suite ANSYS. L'utilisateur peut également y intégrer les structures mécaniques associées (refroidissement, raidisseur, coffret...) qu'il a récupéré au près du BE Mécanique (cf figure 3.5). Ces structures sont préparées dans un autre logiciel de la suite ANSYS appelé Spaceclaim.

6. Circuit imprimé équipé de ces composants

Lorsque l'utilisateur a terminé d'importer et de préparer son système dans Icepak, il va pouvoir générer un maillage compatible avec le solveur. L'une des fonctions d'intérêt d'Icepak est de pouvoir calculer le Metal Fraction du PCB. Cette fonction permet de générer une matrice de conductivité dans chaque couche du PCB. Ce Metal Fraction décrit le pourcentage de cuivre présent dans un élément du maillage. Par exemple, un élément de maillage sur une piste de cuivre présentera un metal fraction de 1 (100% de cuivre).

Plutôt que de modéliser finement chaque couche et chaque piste du PCB, un maillage plus grossier est réalisé, sur lequel le metal fraction est appliqué (cf figure 3.6). Cela permet de conserver une modélisation fidèle du PCB (d'un point de vue thermique) tout en réduisant le nombre d'éléments (et donc des ressources nécessaires à la résolution).

Il est nécessaire de savoir où le cuivre et le diélectrique se trouvent car certaines cartes sont refroidies par conduction seule. Il faut évacuer les calories en utilisant le cuivre présent dans le PCB, il faut donc le prendre en compte lors des simulations. Le Metal Fraction permet cela sans détailler fidèlement les pistes de cuivre.

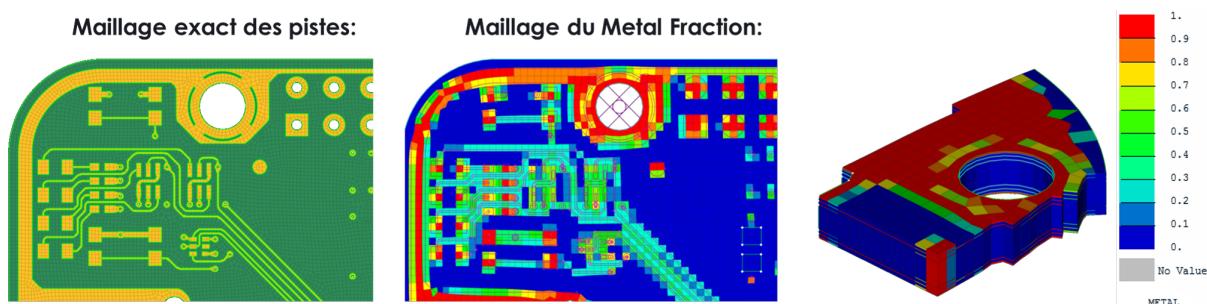


FIGURE 3.6 – Comparaison maillage des pistes et Metal Fraction

Cette mise en données du calcul est à compléter par des conditions aux limites (températures au bord du domaines, puissances dissipées, propriétés des matériaux...). Le modèle est ensuite exporté vers le solveur pour y être résolu. Une fois la solution convergée, l'utilisateur peut l'évaluer et réaliser ses post-traitements.

3.2.2 Modélisation des composants

Pour compléter la modélisation des PCB présentée dans le paragraphe précédent, il est important de correctement représenter la physique des composants individuellement. Seulement une fois la modélisation individuelle fidèle, l'interaction de plusieurs composants sur un même PCB peut être considérée.

L'approche la plus fidèle de modélisation est de représenter tous les éléments et détails d'un composant par volumes finis. Cette approche bien que précise n'est pas envisageable sur un PCB équipé de nombreux composants d'un point de vue ressources nécessaires à la réalisation du calcul. Il faut alors trouver un compromis entre fidélité, pertinence des résultats et coût de calcul. Le spectre de choix des modélisations varie donc d'un modèle proche d'un jumeau numérique jusqu'à une boîte englobante ayant une puissance de dissipation associée.

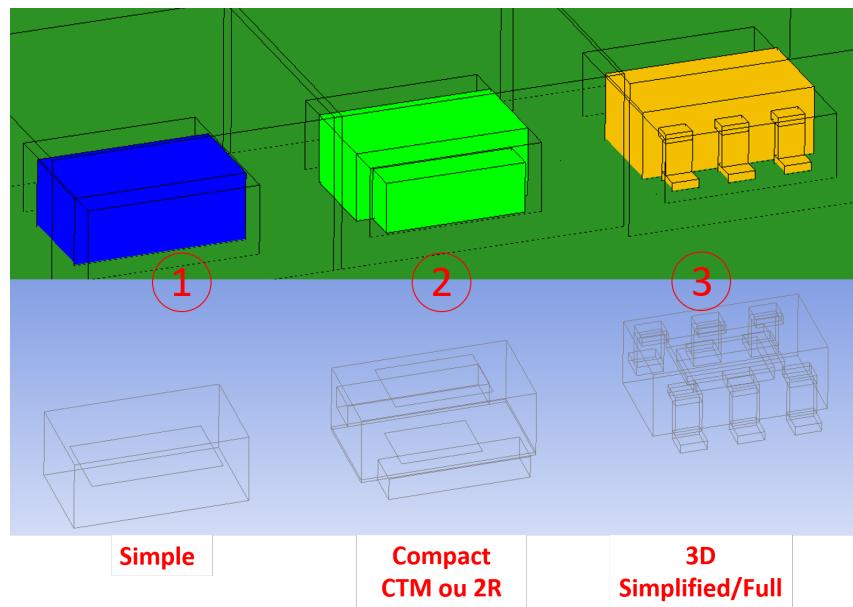


FIGURE 3.7 – Comparaison de différentes modélisations de composants

Il y a principalement 3 types de modèle thermique (dans l'ordre sur la figure 3.7) :

- *Simple* qui correspond à la représentation par un bloc équivalent avec une puissance dissipée. C'est un modèle simplifié pour des composants à faible risque, permettant de distribuer la puissance sur le PCB et d'estimer la température de report du composant.
- *Compact* qui correspond à une représentation fonctionnelle. Elle est définie par rapport à des volumes et surfaces englobants permettant de modéliser en regroupant les parties du composant ayant la même fonction. Ces modèles ne contiennent pas d'éléments volumiques mais un système nodal réduit (2R ou CTM) pour représenter les échanges thermiques internes.
- *3D simplified/full* qui est une version encore plus détaillée que *Compact*. C'est la modélisation volume finie. Le composant est maillé complètement, par exemple chaque pin ou chaque bille pour un BGA est modélisé et maillé individuellement.

Les CTM⁷ sont des modèles utilisés pour prédire le comportement thermique des composants à des points précis : leur boîtier, le PCB et la Jonction⁸. La plupart des CTM utilise un réseau de résistance thermique équivalent à un réseau électrique suivant la loi d'Ohm. Cela est justifié par le fait que la loi de Fourier et celle d'Ohm sont analogues (cf tableau 3.2).

Ces CTM sont donc un réseau symbolique de résistances qui décrit son comportement thermique en prenant en compte les interactions avec son environnement extérieur, par exemple, la face BOTTOM en contact avec le PCB. Ce réseau peut être représenté sous la forme d'une matrice (symétrique, positive) ou bien un graphe. Il y a généralement 2 choix de taille de CTM (cf figure 3.9) :

- 2R est une représentation très simplifiée (2 Résistances) du composant : un nœud interne Jonction, connecté à sa face TOP et BOTTOM. La puissance dissipée du composant est appliquée sur ce nœud interne.
- DELPHI : Les réseaux plus complexes, dans lesquelles le nombre de nœuds internes et externes dépassent ceux des 2R.

7. Modèle thermique compact

8. noeud enregistrant la plus grande hausse de température

Le but est de décrire le composant d'un point de vue géométrique ainsi que son comportement thermique. Ces réseaux de CTM sont basés sur des noeuds qui peuvent être de 2 types :

- Internes, ne possédant pas de géométrie et qui servent généralement de source de puissance dissipée.
- Externes, associés à une géométrie représentée par des éléments de maillage surfacique. Cette géométrie peut être soit un rectangle soit un cuboïde. Ces noeuds externes font le lien entre les volumes finis du maillage et le modèle nodal.

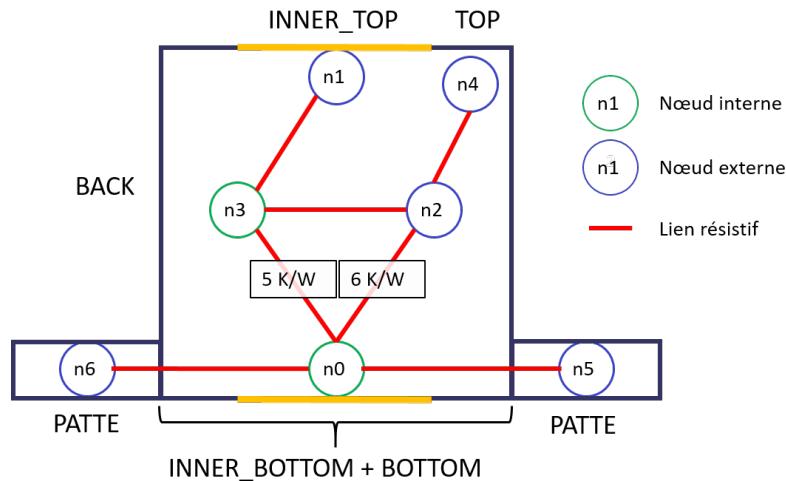


FIGURE 3.8 – Exemple du réseau résistif d'un CTM

De ce réseau ainsi formé (cf figure 3.8), il est possible d'assigner ainsi que de relier entre eux des noeuds des valeurs de capacité électrique et de résistance. La résistance thermique entre 2 noeuds va former le modèle résistif présenté dans la partie 3.2.2.

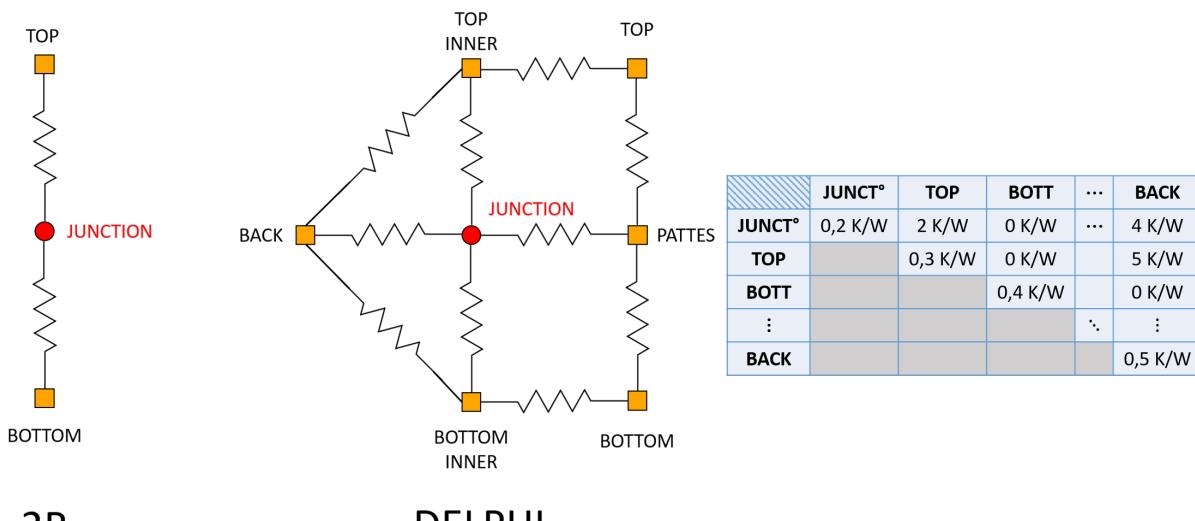


FIGURE 3.9 – Modèle résistif représentant les dissipations thermiques d'un composant

Ces CTM peuvent être obtenus par les constructeurs de composant. Dans les cas où les modèles CTM n'existent pas, Thales se charge de la création des modèles. Les composants sont modélisés en 3D grâce à leur datasheet puis réduits à un réseau CTM à l'aide d'algorithmes. Tous les modèles créés en interne sont validés par des experts et ajoutés à la base de données du groupe.

3.3 Étude de faisabilité

Le processus actuel (cf figure 3.2) n'est pas exempt de défauts (appelés irritants). Comme par exemple, l'utilisateur se doit de maîtriser plusieurs logiciels avec des interfaces graphiques différentes. L'entreprise se doit d'avoir plusieurs solutions logicielles répondant au même besoin pour ne pas être dépendant d'une seule méthode et être pris à dépourvu si l'éditeur d'un des logiciels ne soutient plus le développement. Il faut aussi challenger les éditeurs dans le but qu'ils proposent de nouvelles fonctionnalités et que leur offre reste attractive et compétitive.

Il est donc nécessaire aux entreprises d'affecter des ressources sur la recherche de processus alternatifs. Elles optent alors pour des logiciels ayant des atouts spécifiques avec un potentiel significatif d'optimisation ou décident de garder le même processus avec cependant des nouvelles attentes en fonctionnalités.

3.3.1 Processus actuel et irritants

Dans le cas spécifique d'Icepak, son meilleur est l'irritant principal (cf figure 3.10) et la raison pour laquelle différentes solutions de remplacement sont évaluées dans différentes entités THALES. Pour ce stage, les outils ANSA et META développés par l'entreprise BETA sont étudiés à travers d'un POC⁹ chez THALES DMS Élancourt.

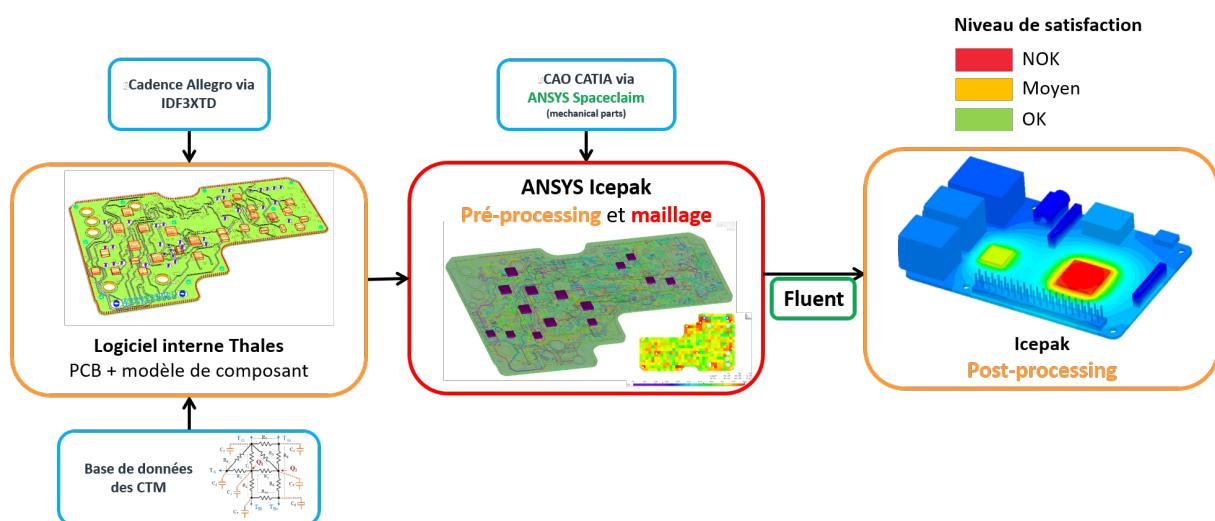


FIGURE 3.10 – Processus actuel avec les irritants labellisés

9. Preuve de concept

Multitude de logiciels différents :

Dans le processus actuel, la solution logicielle est fournie par l'éditeur ANSYS. Elle propose tous les outils nécessaires pour la modélisation, le maillage et la simulation de systèmes (mécanique, fluidique, thermique, électromagnétique...). La suite de logiciel d'ANSYS est un regroupement de plusieurs logiciels, compatibles entre eux. Cette suite permet d'avoir un environnement commun entre les disciplines pendant la vie d'un projet. Néanmoins, cette approche constraint les utilisateurs sur certains aspects.

Ils doivent d'abord se former sur plusieurs logiciels venant du même éditeur, mais ayant des interfaces graphiques différentes. Lors de mon stage, j'ai dû alors consulter un guide utilisateur écrit par le fabricant[7], des manuels de prise en main interne écrit par des collaborateurs Thales ainsi que l'aide de mon responsable de stage. Pour un nouvel arrivant dans l'entreprise, comme ce fut mon cas, cela entraîne plusieurs jours qui sont dédiés à l'apprentissage ralenti dû à l'ergonomie et du temps entre chaque utilisation à cause de l'avancée naturelle des projets.

Le fait de séparer chaque fonctionnalité en logiciel individuel bloque aussi l'utilisateur sur sa liberté de corriger le projet comme il le souhaite. En d'autres mots, dès que le projet quitte un logiciel (par exemple un mailleur) et qu'il rencontre par la suite un problème dû au travail fait dans celui-ci, cela oblige l'utilisateur à remonter dans la chronologie du projet et à recommencer à partir du logiciel fautif. Pour l'équipe de simulation du BE, qui par sa fonction doit constamment paramétriser le modèle afin d'obtenir des températures ou réactions souhaitées, elle est donc limitée ainsi que ralentie dans son travail.

Dépendance à un unique processus :

Thales est un grand groupe travaillant sur des projets pour différents gouvernements. Il est soumis, lui et ses collaborateurs, à un engagement de confiance qui peut être menacé par des personnes ou organisations. Ces menaces se manifestent potentiellement par des blocages de logiciels. En paliation de cela, il est décidé, dans la politique Thales, de ne pas avoir un seul et unique processus dépendant d'un fournisseur externe.

Cette décision de multiplier les choix de processus permet aussi d'hybrider des projets afin d'utiliser les atouts de chaque logiciel ou format de fichier. Tout cela est fait pour gagner en sûreté, indépendance et en vitesse dans la réalisation de projet.

Icepak :

Le choix du logiciel Icepak a été fait à l'époque car il était un des seuls à faire du Metal Fraction et des réseaux nodaux. Ses outils de pré-processing et de post-processing sont adaptés à la modélisation de PCB avec son stockage en arborescence des objets qui permet de manipuler composant par composant.

Cependant, il pose des contraintes aux personnes l'utilisant. Les défauts d'ergonomie, la lenteur lors d'importations, de sélections et de modifications de projet font du meilleur d'Icepak le principal irritant.

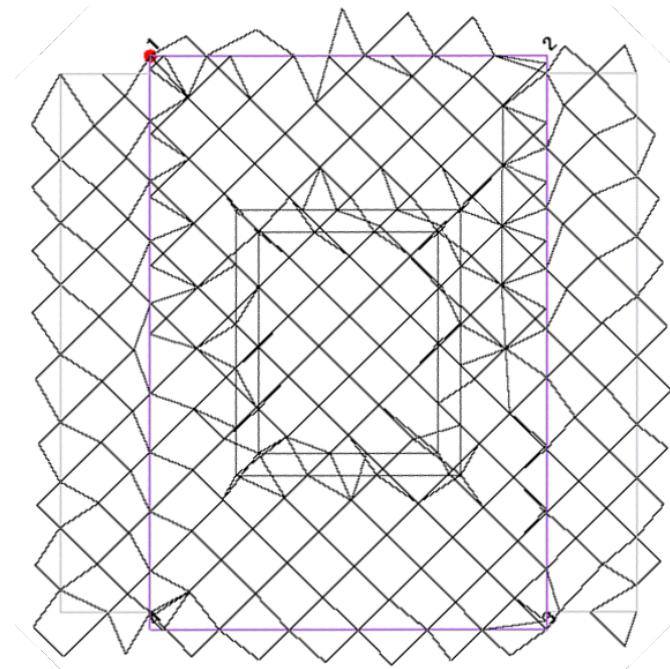


FIGURE 3.11 – Exemple de maillage fourni par Icepak

Il offre une quantité de paramétrisation à l'utilisateur permettant de créer un maillage proche du résultat souhaité sur des exemples simples. Il est basé sur un maillage orthonormé basé sur le repère globale du système. Il crée majoritairement des mailles hexaédriques. Il est adapté pour les formes rectangulaires mais n'est pas optimal pour prendre en compte les formes complexes. L'utilisation d'éléments tétraédriques est alors appliquée mais pour un résultat de mauvaise qualité (cf figure 3.11).

Il est donc nécessaire de faire une étape de post-traitement de ce maillage afin de le modifier aux besoins souhaités. Or, Icepak n'offre aucune possibilité de modification locale. Il faut faire des modifications et les tester en régénérant le maillage dans sa totalité en espérant résoudre le problème. Pour des maillages à des millions d'éléments, c'est une perte de temps peu maîtrisable et bloquante.

Bien que le maillage est généré dans Icepak, il est de nouveau modifié dans le solveur Fluent pour correspondre aux critères de qualités exigés par ce dernier. Cette étape est masquée et l'utilisateur n'a pas accès aux modifications. Toute erreur qui peut se produire est très peu détaillée ainsi que peu de messages de retour permettant de vérifier et contrôler les processus en cours. Comme dernier défaut il y a l'export du maillage vers le solveur Fluent du même éditeur qui se fait par l'écriture d'un fichier en ASCII (long à écrire et volumineux).

3.3.2 Solution à évaluer

Le nouveau processus imaginé en remplaçant Icepak par ANSA est celui présenté en figure 3.12.

En comparaison avec le processus actuel décrit en figure 3.10, tous les fichiers d'entrées sont regroupés dans un seul logiciel. Ces fichiers comprennent ceux créés par les 2 autres équipes du BE et un accès à une base de données stockant les informations nécessaires pour des simulations thermiques et mécaniques. Il n'y a plus besoin de logiciels "traducteurs" ou intermédiaire, tout est modifiable par l'utilisateur dans ANSA.

Les résultats de simulation de FLUENT, qui a été retenu comme solveur car compatible de l'utilisation des réseaux nodaux, sont exportés vers META afin que l'utilisateur puisse les analyser.

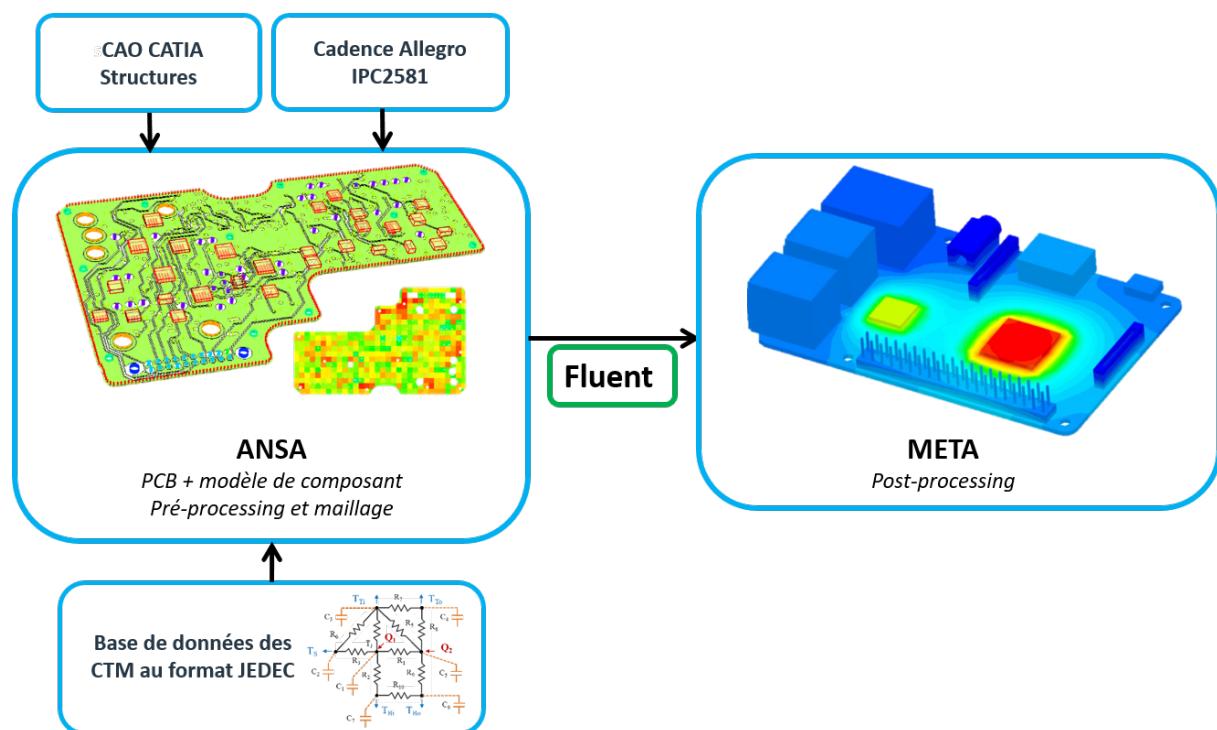


FIGURE 3.12 – Processus théorique avec les solutions logicielles de BETA

Le choix a été fait dans le BE d'Elancourt d'étudier ce nouveau processus, car ANSA est connu pour son meilleur de qualité. De plus, ces logiciels sont déjà utilisés pour d'autres processus chez THALES DMS, dont quelques personnes dans l'équipe simulations thermiques et mécaniques .

Spécialiste maillage :

ANSA est un logiciel qui permet d'importer une conception assistée par ordinateur (CAO) qui est issue d'une grande variété de logiciels, de faire des corrections et simplifications directement sur la structure et ensuite de le mailler pour le rendre prêt pour un solveur et de l'exporter au format souhaité. Il peut actuellement supporter nativement plus d'une cinquantaine de logiciels propriétaires pour l'import et l'export, ainsi que la possibilité d'utiliser et programmer des plugins afin de créer des routines de vérification, automatisation ou autre.

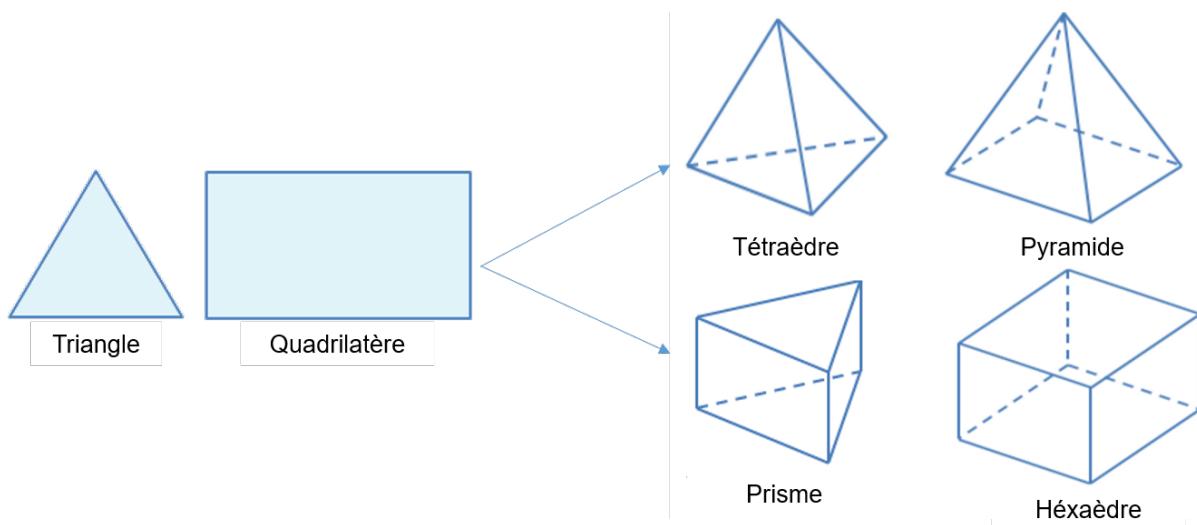


FIGURE 3.13 – Type d’Élément Fini disponible dans ANSA (2D et 3D) (source Wikipédia)

Le mailleur est capable de faire du surfacique ainsi que du volumique selon des algorithmes propriétaire BETA. Le maillage est principalement hexaédrique (utilisation de carré (2D) et de cube (3D)) ainsi que tétraédrique (triangle (2D) et tétraèdre (3D)). Il supporte aussi très bien la gestion simultanée de ces types de maillage ce qui induit l’apparition de prismes et de pyramides (cf figure 3.13). Le maillage est défini par rapport aux faces créées dans la CAO et le maillage est séparé objet par objet. Il est donc possible d’affiner ou de modifier une zone de maillage rapidement et sans devoir remailler tout le projet.

Réactivité et Innovation du fabricant :

Actuellement, BETA a pour objectif d’intégrer la gestion de simulation de PCB dans ANSA. Il y a donc un échange avec Thales depuis deux ans afin de discuter des besoins et des envies par rapport à cet ajout. Cependant, BETA a cette volonté d’avoir un outil générique non soumis à des formats propriétaire, d’où la nécessité de passer à des formats standards pour le PCB et les réseaux résistifs (cf partie 4). Avant mon arrivée, il y a eu une démonstration de cette interaction avec la mise en place d’un export en l’IPC-2581¹⁰ du PCBA par Thales et son importation dans ANSA par BETA.

Il est donc possible dans les dernières versions d’importer une structure de PCBA avec ces pistes, vias, une représentation de ces composants ainsi que les matériaux qui le constituent (cf figure 3.14). À partir de cette géométrie et informations, il est possible de créer le maillage volumique.

De plus, BETA continue de faire des ajouts montrant son envie d’intégrer cette méthode, tel que le Metal Fraction qui est disponible dans Icepak. Au lieu d’avoir une grille superposée sur le PCB comme dans la version d’Icepak où l’utilisateur sélectionne le pas afin de lier précision et performance de calcul; dans ANSA, le calcul se base sur le maillage existant du PCB (cf figure 3.15) qui peut être aussi simplifié si nécessaire.

10. Format de fichier d’un PCB équipé de ses composants à un format standard

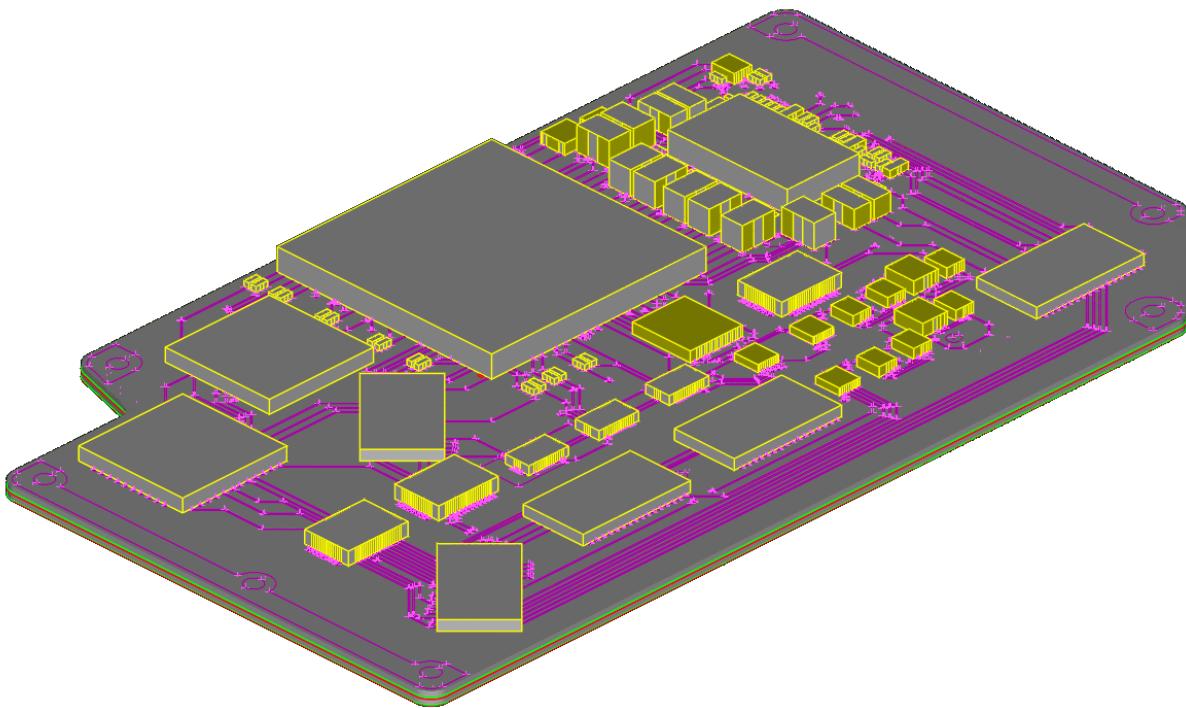


FIGURE 3.14 – Résultat de l'import du PCB dans ANSA grâce à l'IPC-2581

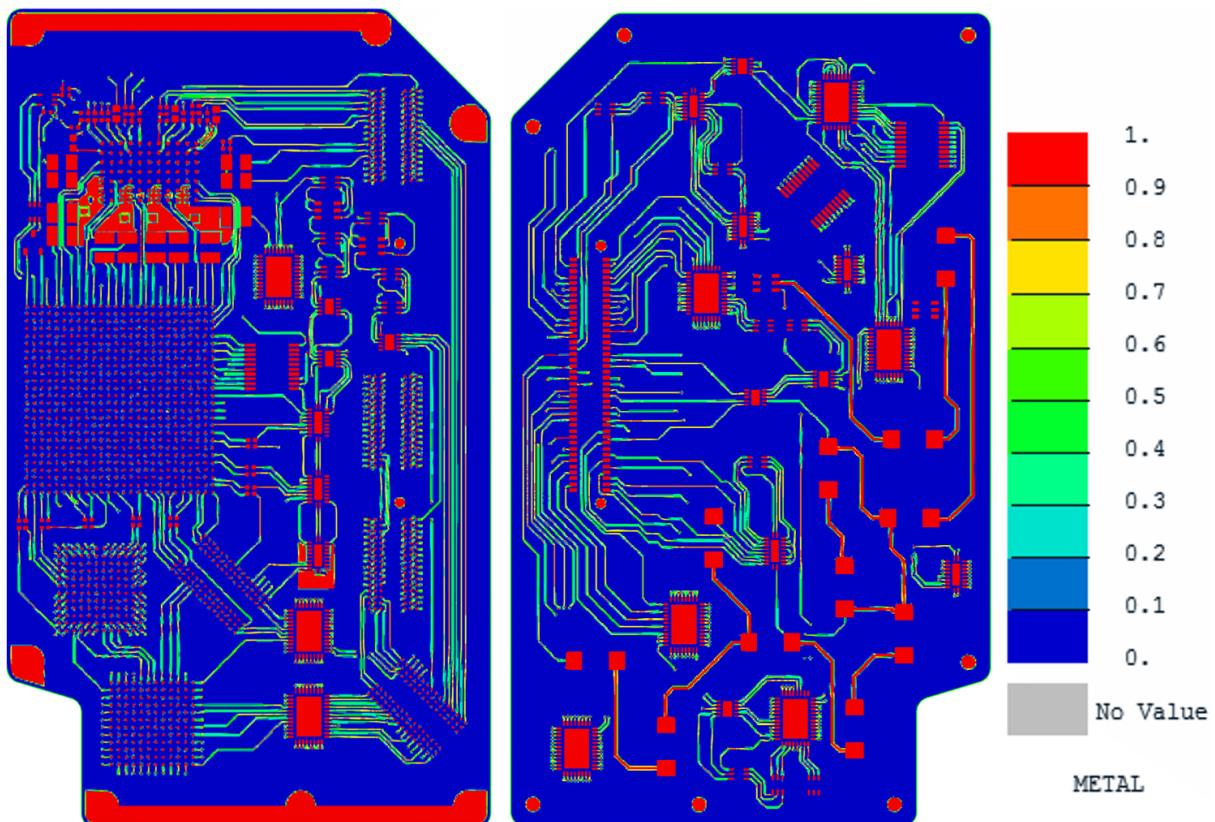


FIGURE 3.15 – Metal Fraction calculé dans ANSA (TOP et BOTTOM)

3.3.3 Objectif du stage

Il n'est pas possible d'appliquer ce nouveau processus tel qu'introduit au début du paragraphe 3.3.2. De nouvelles fonctionnalités sont nécessaires dans ANSA et des formats propriétaires Thales sont à mettre à jour à un format standardisé (cf respectivement les cases orange et violet de la figure 3.16).

BETA veut ajouter la gestion des maillages des PCB ainsi que des CTM dans son outil ANSA. Il souhaite utiliser des formats standardisés et a déjà implémenté l'import de PCB avec ses différentes couches et pistes de cuivre. Il reste cependant encore l'import de CTM au format JEDEC JEP30 et la mise en relation entre tous ces objets dans ANSA et dans son export vers le solveur.

Du côté de Thales, il faut mettre à jour sa base de données des CTM au format JEDEC ainsi qu'avoir la structure du PCB de Cadence Allegro au format IPC-2581. Cette dernière partie a déjà été effectuée en partie, cependant le passage de la base de données nécessite l'utilisation de ressources dans le service informatique ainsi que la vérification de la conformité des composants à ce nouveau format.

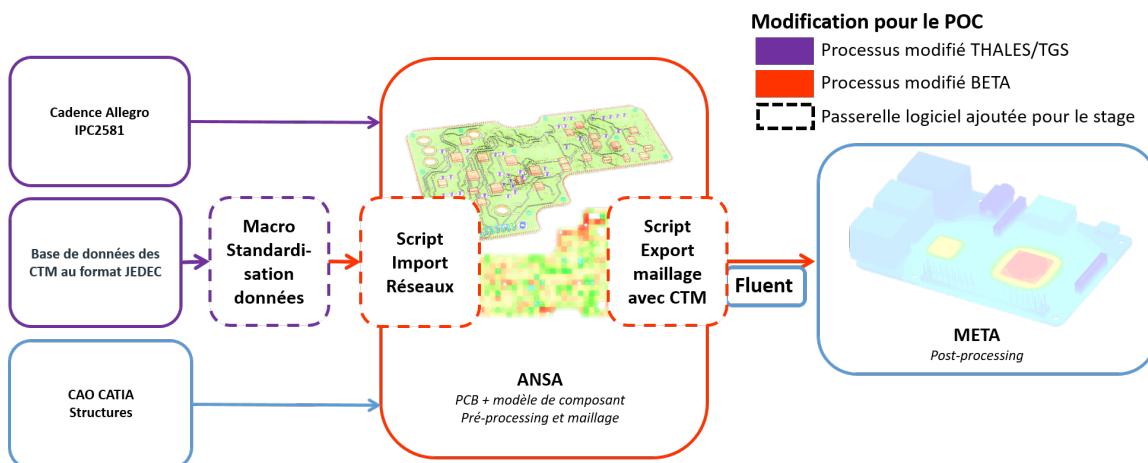


FIGURE 3.16 – Processus adapté pour le stage avec les solutions logiciels de BETA

Afin de montrer la faisabilité et l'intérêt de ce nouveau processus, il a été décidé de créer une première version fonctionnelle permettant d'obtenir des résultats de simulation. Une comparaison est prévue avec différentes entités Thales qui étudient des processus alternatifs avec d'autres logiciels.

Pour faire fonctionner ce POC avec la structure logicielle actuelle, il faut rajouter des passerelles représentées par des programmes Python et des scripts ANSA (cf contours pointillés de la figure 3.16). Ces tâches requièrent une compétence en programmation et en vérification ainsi que du temps à y consacrer. Les équipes de simulations thermiques ne possédant pas forcément ce profil ou le personnel suffisant pour la charge de travail ajoutée, un stage fut créé afin d'accomplir ce POC.

Le but de ce stage est, en partie, de créer ces solutions provisoires de passerelles logicielles et agrémentées d'un GUI¹¹ pour chacune. Il faut aussi être en contact avec les équipes de BETA, afin de leur rapporter les envies des thermiciens de chez Thales, les difficultés lors de la programmation du POC ainsi que des exemples de fichiers, programmes, etc.

11. interface graphique

Chapitre 4

Standardisation des données

La première étape est de standardiser les fichiers utilisés actuellement dans le processus de simulation afin d'être compatibles avec la solution logicielle envisagée. Parmis les 3 imports nécessaires (cf figure 3.16), ceux du PCB (au format IPC-2581) et des CAO (créées dans CATIA) sont déjà disponibles. Il reste celui qui concerne les modèles réduits de composants stockés dans une base de données qu'il faut formaliser au standard choisi : le JEP30. Cette norme a été définie par JEDEC, un organisme de normalisation des semi-conducteurs constitué par la collaboration des entreprises liées à ce milieu en tant que constructeur ou consommateur.

4.1 Base de données interne

La plupart des standards de fichiers mentionnés auparavant sont basés sur le langage de balisage générique XML. Cela permet de créer des fichiers de paramétrisation ou de stockage de données compréhensibles pour l'utilisateur ainsi que pour les logiciels. Cependant, ce choix de règles entraîne de multiples différences entre chaque type de fichier et la nécessité d'un programme de réécriture.

4.1.1 Format xml

Un fichier en langage xml se base sur des balises qui signalent le début ainsi que la fin d'une section, correspondant à un type de données. Ce format de fichier peut être assimilé à un graphe hiérarchique ayant une seule racine (*nœud document*) et chaque balise correspond à un nouveau nœud (cf figure 4.1). Un nœud est ouvert par l'utilisation d'une balise `<balise>` et est fermé en la rappelant `</balise>`

Les noms de ces balises ne sont pas imposés et sont le choix du créateur du fichier. Il faut alors une mise en accord entre les logiciels exportateur et importateur pour créer une charte permettant le transfert de données. D'où la nécessité d'organisme (comme JEDEC) qui crée des nomenclatures spécifiques pour les modèles de composants pour le cas du JEP30, ou encore des consortiums comme l'IPC-2581 afin de standardiser la définition des PCB.

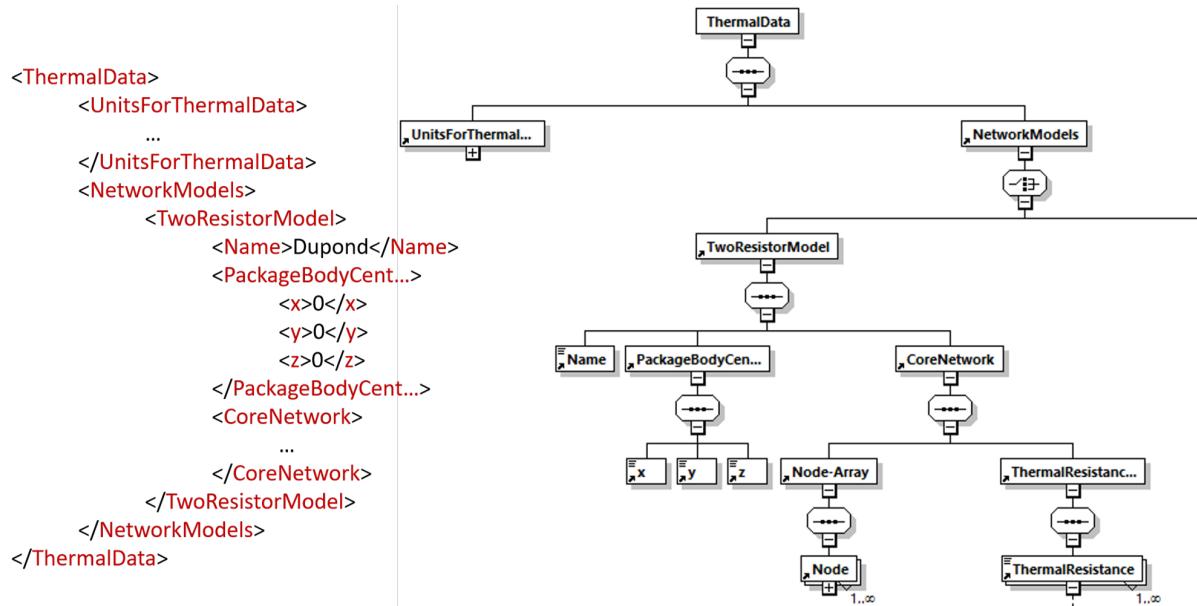


FIGURE 4.1 – Exemple de fichier .xml (JEP30) et son graphe associé

4.1.2 Formats propriétaires Thales

Dans le cadre de ce stage, nous allons principalement parler des formats présents sur la base de données des composants. Elle est basée sur les données fournies par les constructeurs (datasheet) afin de les modéliser en 3D et ainsi créer les jumeaux numériques de ces composants. Les modèles 3D détaillés sont ensuite réduits sous la forme de réseau RC (voir paragraphe 3.2.2) par algorithme, écrit au format .xml et stockés dans la base. La base de données de Thales existe depuis de nombreuses années et s'enrichie chaque mois de nouveaux composants et modèles réduits.

Au cours des années, le formalisme d'écriture des fichiers .xml Thales a évolué. Il coexiste aujourd'hui 2 nomenclatures dans la base de données. Cela entraîne que le programme de standardisation des données doit les prendre en compte ainsi que d'autres exceptions qui ont été identifiées mais qui ne sont pas bloquantes pour la réalisation du stage. Ces 2 formats ont leurs spécificités telles que :

- l'ancien format, repérable par sa balise nommée *Categories*, est pensé pour des composants cubiques ayant potentiellement des pattes. Pour définir chaque face, seulement les dimensions générales (la largeur et la longueur) sont fournies.
- le nouveau format repérable par sa balise nommée *Vertices* qui est orienté vers la liberté de définition du modèle. Les faces sont définies selon une succession de points qui formeront une boucle et ainsi une surface.

4.2 Format JEP30 selon JEDEC

Cette norme s'applique aux composants électroniques de toutes formes. Elle fait partie d'une structure de définition couvrant les données de classification : électrique, physique, thermique, matériaux, substances ainsi que les processus d'assemblage. Cette ligne directrice se concentre spécifiquement sur la sous-section thermique du modèle de pièces électroniques [8].

4.2.1 Base universelle

Le format JEP30 est un standard évoluant selon les besoins des industriels. Le but est de contenir toutes les informations concernant les composants électroniques. Il y est retrouvé les informations du constructeur ainsi que 4 différentes sections : électrique, paramètre d'environnement, packaging et thermique. Les sections peuvent déclarer des unités de références, des processus et leurs conditions, ainsi que des modèles déclarés par l'utilisateur selon le choix fournit dans le lexique.

4.2.2 Personnalisation pour correspondre aux besoins

Le standard JEP30 est déjà utilisé par certains éditeurs de logiciels notamment Icepak. Il est alors possible de générer un fichier JEP30 correspondant à un projet dans le processus de simulation actuel. En appliquant de la rétro-ingénierie, j'ai pu créer un programme Python qui génère un fichier format JEP30 équivalent aux informations d'un projet ouvert dans Icepak.

Pour pouvoir générer le fichier .xml au standard JEDEC, il faut récupérer les informations par rapport aux composants tel que leur géométrie, leur position et leur modèle physique permettant de les simuler thermiquement. Pour cela, je me suis limité aux informations disponibles dans le logiciel interne Thales et qui n'étaient pas liées à des fichiers en lien avec la modélisation du PCB.

Le programme, que j'ai réalisé, demande 3 renseignements à l'utilisateur (cf figure 4.2) :

- un fichier CSV exporté du logiciel interne Thales qui comprend l'emplacement, l'angle et la puissance des composants.
- un dossier contenant les informations des composants présentes sur la base de données (au format .xml spécifique Thales (cf partie 4.1.2))
- la valeur de l'épaisseur du PCB que l'utilisateur doit connaître

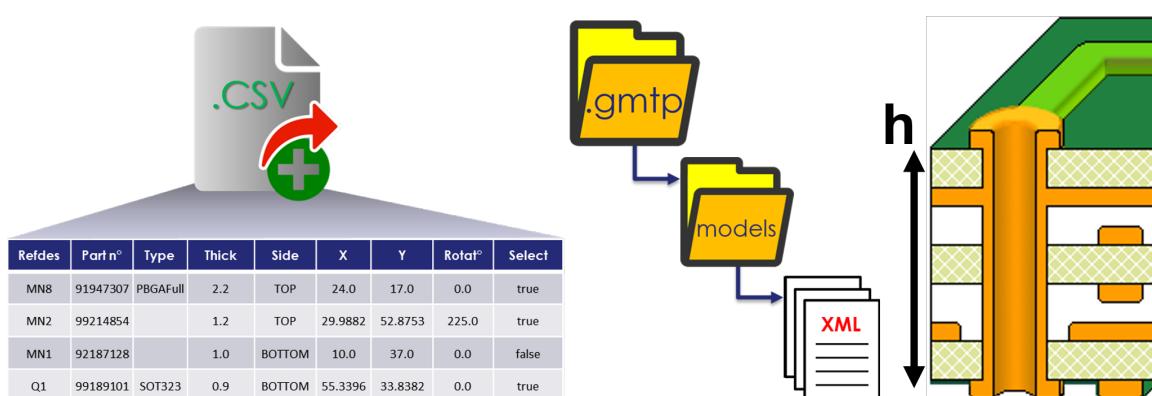


FIGURE 4.2 – Fichiers à fournir à la macro de standardisation

Gestion du placement et angle :

Bien qu'Icepak supporte la norme JEP30, il n'est pas conforme au formalisme en tout point. Au lieu de l'utiliser simplement comme un dictionnaire de composants comme prévu par JEDEC, il l'utilise comme fichier de configuration ou sauvegarde du réseau. Cela se traduit par le fait qu'à l'import du fichier, les composants doivent se placer et s'orienter correctement. Puisque les angles ne sont pas implémentés dans le JEP30, il est impossible de créer des boîtes avec des angles quelconques (différents de 0° ou 90°) uniquement avec la création de rectangle basé sur le repère global du PCB.

Pour palier à ce manque, il a été implémenté 2 nouvelles balises (cf figure 4.3) :

- *PolygonalFace* qui permet de définir une surface 2D par des points (coins). Il faut rajouter à cela dans quel plan cette surface est défini (xy, xz, yz).
- *InclinedFace* qui est utilisé pour les BACK des composants non-alignés aux axes du repère global car ils ne dépendent pas de plan nommé comme précédemment. Pour cela, il faut lui fournir 2 points, l'axe sur lequel le rectangle est incliné (pour les cotés c'est l'axe z) ainsi que l'angle souhaité.

J'ai donc appliqué une matrice de rotation puis détecté les plans de définitions en calculant les vecteurs directeurs.

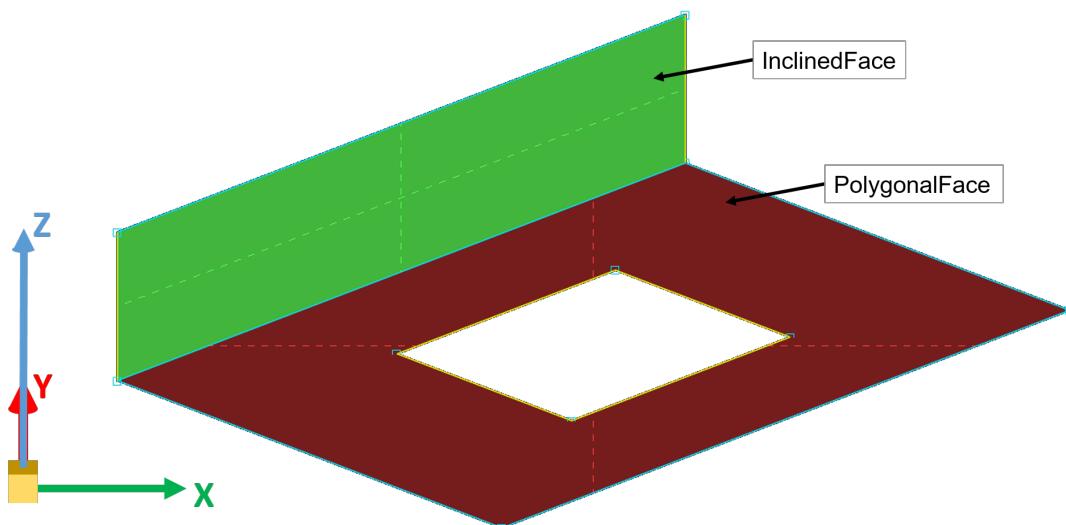


FIGURE 4.3 – Exemple d'objets définis par *PolygonalFace* et *InclinedFace*

Déclaration des BACK :

Il y a également une différence de gestion des BACK dans Icepak. Dans la base de données Thales, ils sont définis sous un seul objet qui contient les 4 cotés du boîtier et qui est attribué à une seule valeur résistive. De l'autre côté, Icepak les gère individuellement et en leurs assignant une résistance (\mathcal{R} en K/W) liée à leurs aires respectives (\mathcal{A} en m^2).

$$\mathcal{R}_{BACK} = \frac{\sum_i \mathcal{A}_{BACK}^i}{\mathcal{A}_{BACK}^i} \times \mathcal{R}_{ref} \quad (4.1)$$

Dans ce format JEP30, il faut s'adapter à la gestion faite par Icepak car le solveur choisi reste Fluent.

La physique d'un composant :

Lors du maillage, il est important que les surfaces des CTM soient coplanaires par rapport à leur surface de contact. Dans la réalité, le boîtier d'un composant est surélevé du PCB par ses pattes ou billes. Dans la base de données, le composant a donc un report par rapport à la hauteur de la face BOTTOM.

Les faces externes doivent être alors projetées sur les structures (PCB ou refroidissement). Ce problème entraîne que le boîtier du composant n'est plus fermé. Ce n'est pas un problème pour le logiciel d'Icepak, cependant cela n'a peu de sens physiquement. Il a été décidé que je devais agrandir les BACK afin d'obtenir de nouveau un solide fermé.

4.2.3 Vérification visuelle et simulation

Chaque étape clé de mon stage a été validée par la simulation et la comparaison de mes travaux avec les outils déjà existants. Dès la programmation du script de traduction du fichier .xml Thales au standard JEP30, des simulations avec le logiciel ICEPAK ont été réalisées.

La première étape de validation du script était visuelle. J'ai pu comparer les modèles de PCB générés par le processus actuel à ceux obtenus par mes travaux et cela sur de nombreuses cartes dont certaines en cours de développement au sein du Bureau d'Études. Une fois la validation visuelle effectuée, les PCB ainsi que leur structure de refroidissement ont été simulés thermiquement.

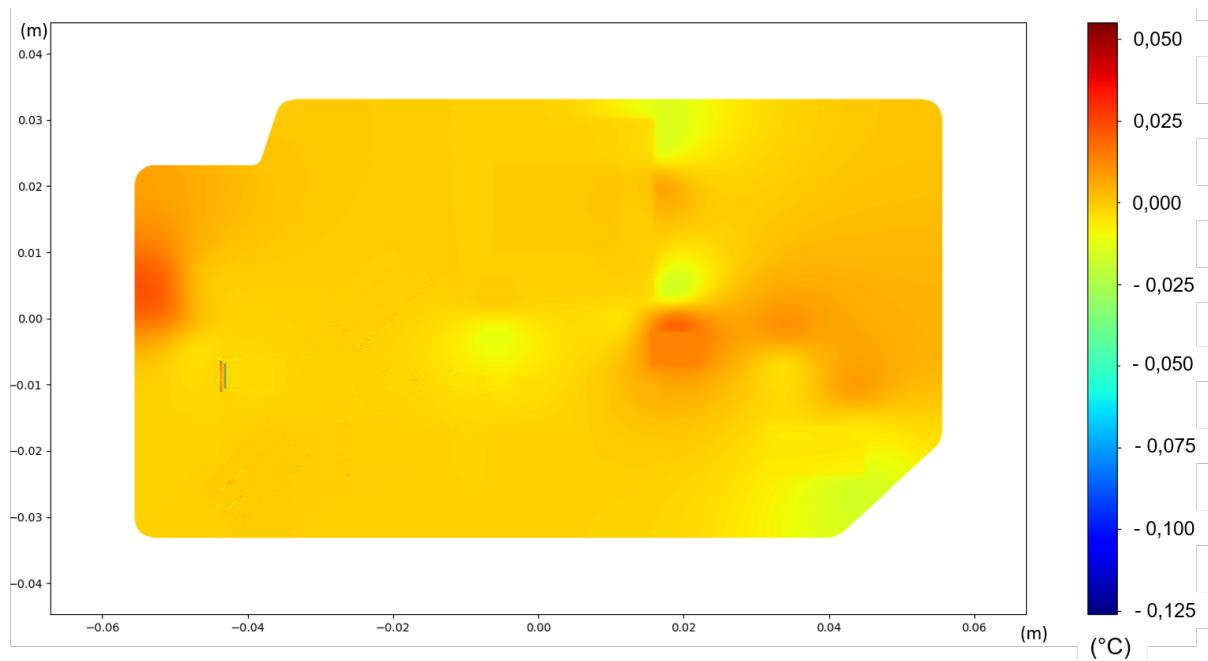


FIGURE 4.4 – Différences des champs thermiques entre les 2 types de réseaux sur un iso-maillage

Pour confirmer le remplacement des réseaux Icepak par ceux enregistrés dans le fichier JEP30, des simulations thermiques ont été effectuées dans Icepak en intervertissant seulement les réseaux. Cela a permis une vérification sur l'échelle du PCB du champ de températures généré par l'ensemble du réseau des composants sur le PCB (cf figure 4.4).

Ces différences de températures allant de -0.125 à 0.050 °C sont considérées valides par rapport au champ thermique observé ayant une plage de 40 à 70 °C. Il y a une différence entre 0.2 et 0.3% sur les valeurs observées dues à des différences de maillages ou de convergence numérique.

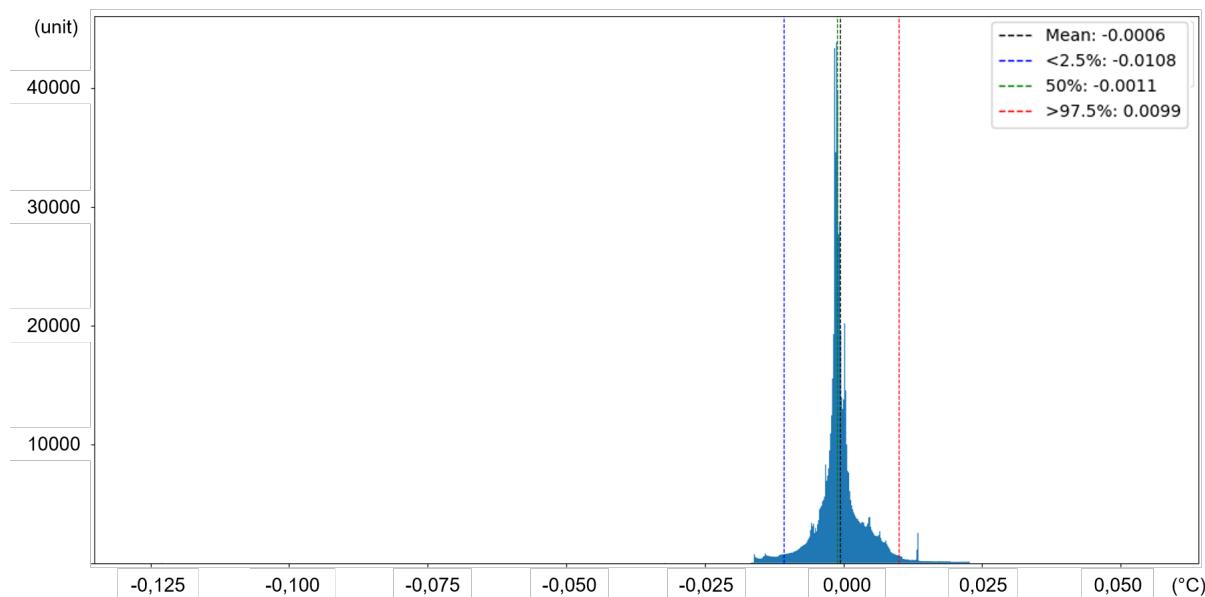


FIGURE 4.5 – Histogramme des différences de températures entre les 2 types de réseaux sur un iso-mailage

Cet histogramme représente la répartition des valeurs de différences de températures obtenues entre les réseaux Icepak et ceux au format JEP30 (cf figure 4.5). Il est observable que 95% des individus sont entre -0.0108 et 0.0099, ce qui correspond alors à un intervalle d'environ 0.01 °C. De plus, la mediane est proche du centième de degré et la moyenne proche de 0.

À l'échelle du composant, il a été possible de comparer les températures de Jonction (T_j) qui ont enregistré des différences en dessous du demi degré d'écart, ce qui correspond à moins de 1% de la température observée (cf figure 4.6). Ces différences ont été imputées à la différence de maillage entre les 2 simulations créées par Icepak.

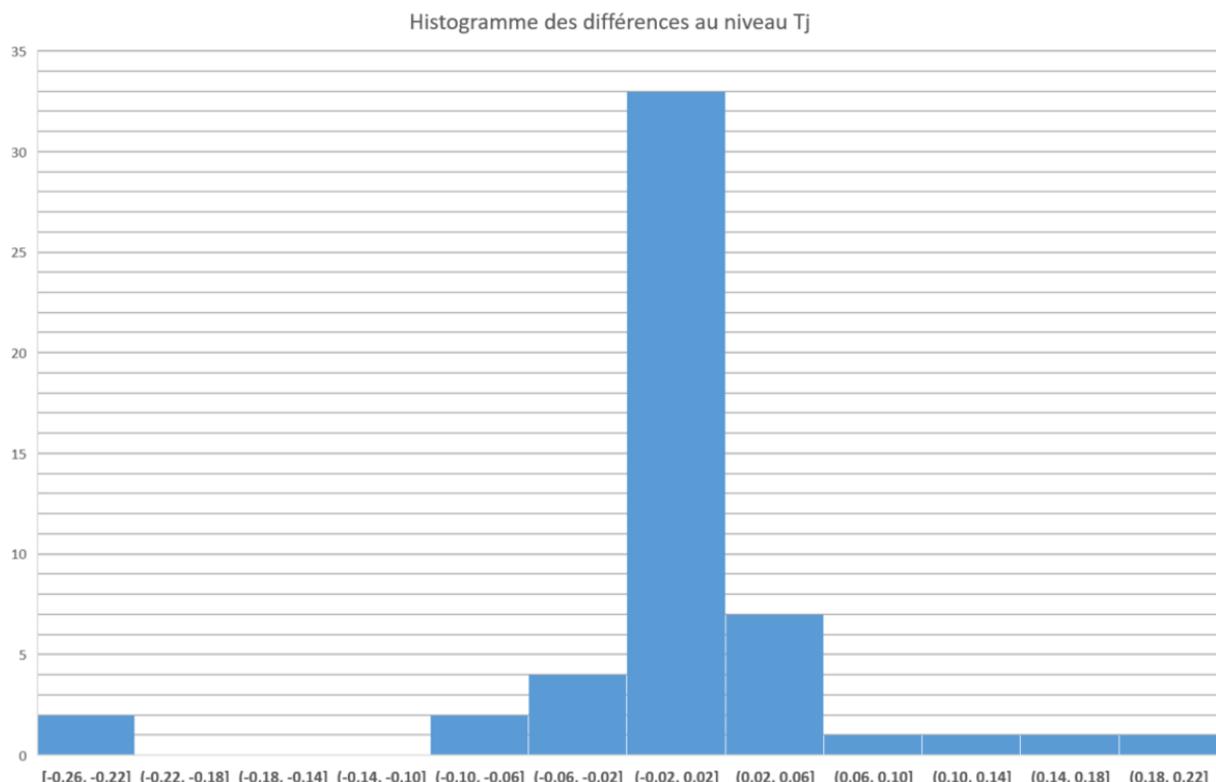


FIGURE 4.6 – Graphique de la répartition des différences des Tj entre les réseaux Icepak et ceux au format JEP30

Chapitre 5

Ajouts de fonctionnalités dans ANSA

Le choix des formalismes JEP30 et IPC2581 ont été amené par la collaboration avec l'entreprise BETA CAE Systems. Elle est une entreprise spécialisée dans l'ingénierie assistée par ordinateur (CAE) à travers la création de logiciel automatique pour la simulation et l'analyse, depuis une trentaine d'année. Les logiciels de pré-processing ANSA et de post-processing META sont évalués pour ce projet.

5.1 Import de réseaux dans ANSA

Le développement d'une fonctionnalité d'import des réseaux est fait parallèlement chez BETA et chez Thales. Ce POC, lui a pour but de prouver la faisabilité de cette nouvelle passerelle à la direction de Thales avant que l'outil ne soit implémenté de façon stable dans ANSA. En parallèle, je suis en contact avec des représentants chez BETA pour partager mes travaux et les problèmes rencontrés afin qu'ils puissent programmer une solution définitive dans le code source.

5.1.1 Difficultés de programmation et de scripting

ANSA permet de créer des routines Python afin de vérifier ou de modifier des CAO. Il possède une interface graphique afin de gérer ces routines ainsi que d'avoir un lexique permettant de chercher les différentes fonctions de manipulation d'objet ANSA. Étant un outil d'une grande versatilité, la prise en main de cette bibliothèque est chronophage malgré les documentations disponibles.

Ce logiciel est principalement prévu pour être utilisé avec le GUI natif à la disposition de l'utilisateur (cf figure 5.1) qui comprend de nombreuses actions possibles affichées dans la partie droite du logiciel et rangées dans des onglets selon leurs fonctionnalités. Lors du scripting avec la bibliothèque ANSA, il a fallu programmer en suivant les étapes que ferait un utilisateur avec son clavier et sa souris (en sélectionnant, glisser-déposer, raccourcis clavier).

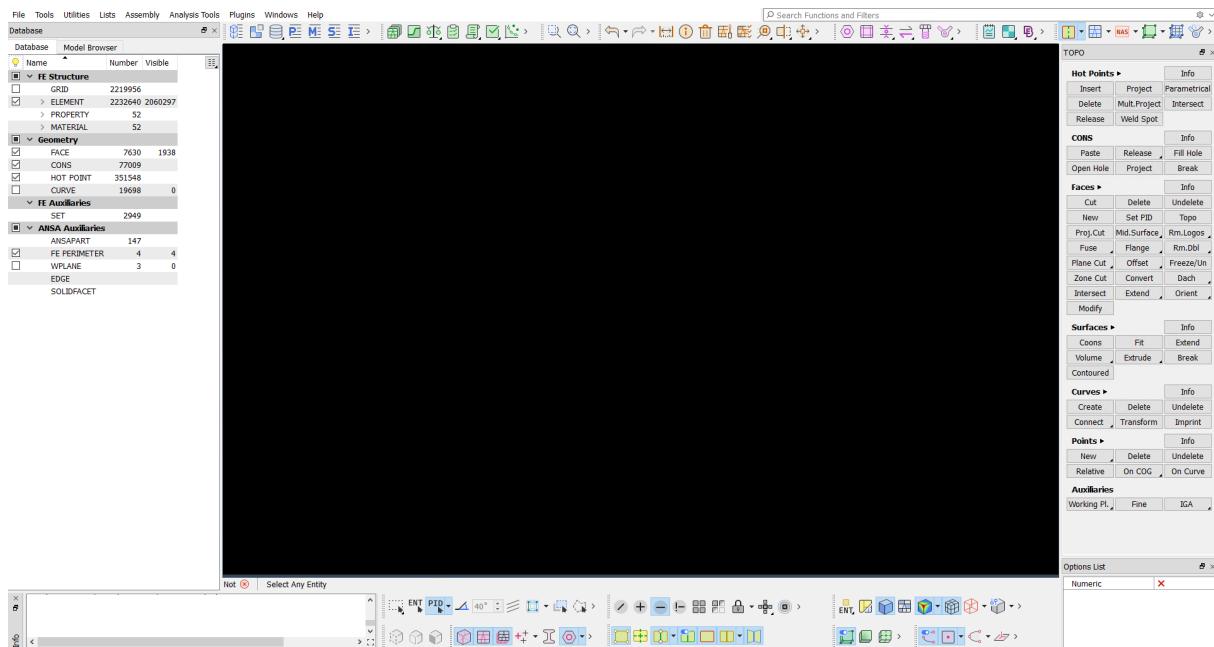


FIGURE 5.1 – Interface à la disposition de l'utilisateur

Par rapport à la librairie ANSA, il y a un manque d'explications sur les objets dits "Entity", principalement ceux qui concernent les variables et fonctions, qu'elles soient privées ou bien publiques. Ces Entity correspondent aux points, arêtes, faces, propriétés, de chaque élément généré dans ANSA et manipulé par mon script. Par exemple, pour les obtenir, il faut utiliser leur Identifiant (ID) sauf que cette information n'est pas fixe car modifiable par l'utilisateur et dépendante des identifiants déjà déclarés.

5.1.2 Arborescence et séparation par composant

Cette routine d'importation de réseaux résistifs thermiques crée des objets qui ne sont pas supportés nativement par ANSA. Pourtant elle ne doit pas impacter les objets précédemment créés par l'utilisateur (PCB, structure, ...). Les utilisateurs doivent pouvoir modifier la CAO et le réseau comme ils le souhaitent. J'ai donc créé des GUI pour toutes les routines permettant de paramétriser les programmes sans devoir les modifier directement dans le code source.

Tout d'abord, pour chaque nœud présent dans le fichier JEP30, j'associe une propriété renommée par rapport au repère topologique (numérotation du composant sur le PCB) auquel il appartient ainsi que le nom du nœud. Je réunis chaque face dans un "part" qui va représenter un composant dans ANSA. Tous ces composants sont réunis dans un dossier "Networks" afin de les retrouver facilement (cf carré 1 figure 5.2). Les nœuds externes sont associés à leur composant mais les nœuds internes n'apparaissent pas dans la carte d'information de ce composant.

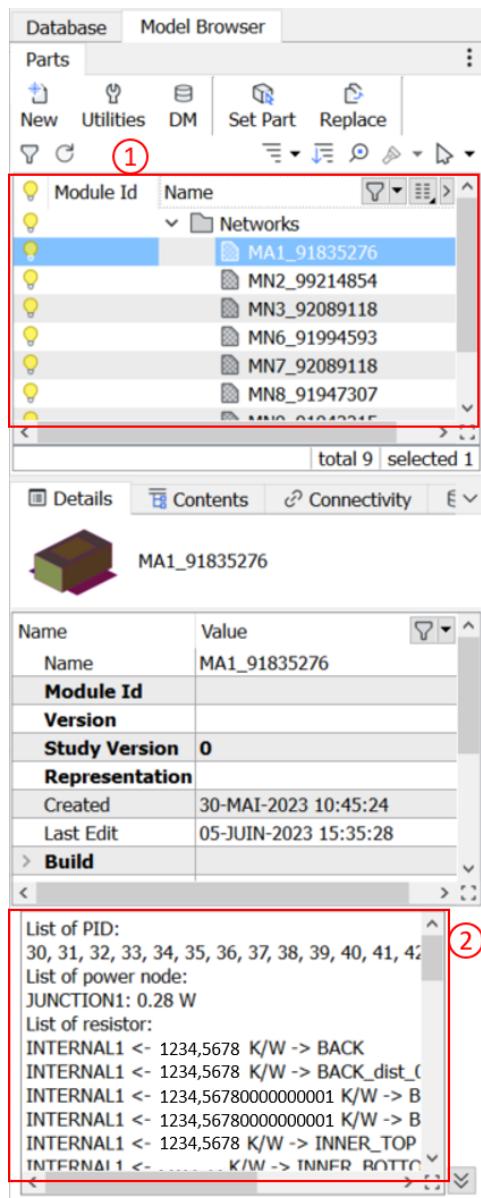


FIGURE 5.2 – Interface à la disposition de l'utilisateur

Il faut un emplacement pour stocker toutes les informations manquantes telles que les nœuds internes, les puissances dissipées, les résistances ou capacités des réseaux. Il a été décidé d'utiliser la partie commentaire des "part" (cf carré 2 dans figure 5.2). J'y renseigne alors toutes les PID¹ des nœuds (internes et externes) du composant, les noeuds ayant une puissance électrique dissipée et tout le réseau résistif et de capacité. Cette partie commentaire est disponible à l'utilisateur et peut donc être personnalisée.

Sur des projets de cartes à plusieurs dizaines de composants, si l'utilisateur souhaite changer les puissances dissipées de chaque composant pour correspondre à différents scénarios d'utilisation, le faire à la main est long et sujet à l'erreur. Pour modifier plus facilement ces puissances et afin de se rapprocher du processus actuel de simulation qui avait cette possibilité, une macro et son GUI ont été créés afin d'exporter puis d'importer de nouveau un fichier .csv avec les puissances modifiées.

1. Identifiant d'une propriété dans ANSA

J'ai également introduit des vérifications et des liens entre chaque face afin que la topologie de chaque composant soit respectée et qu'au final les solides soient bien définis. Par exemple, les faces TOP et BOTTOM sont découpées afin de loger les faces centrales (INNER_TOP et INNER_BOTTOM). Il reste cependant des étapes essentielles qui sont à la charge de l'utilisateur et spécifique pour chaque projet comme la création des volumes, d'interfaces entre les différentes structures et le choix des maillages surfacique et volumique.

5.2 Export du maillage avec CTM

Il reste des tâches à accomplir telles qu'importer les structures du PCB ou de refroidissement, associer les faces BOTTOM des réseaux avec le PCB, associer les matériaux des solides pour la simulation Fluent, ainsi que créer le maillage surfacique et volumique.

5.2.1 Fichier format .cas

Après que l'utilisateur ait fini toutes les modifications nécessaires et que le maillage est définitif, il reste à l'exporter. Pour cela, il utilise le format .cas afin qu'il puisse être lu par le solveur Fluent. Ce format de fichier permet de transmettre un maillage d'un projet. Il se base sur des balises qui sont des nombres associées à un objet précis (10 : les points, 13 : les faces, 12 : les solides, 37 :...).

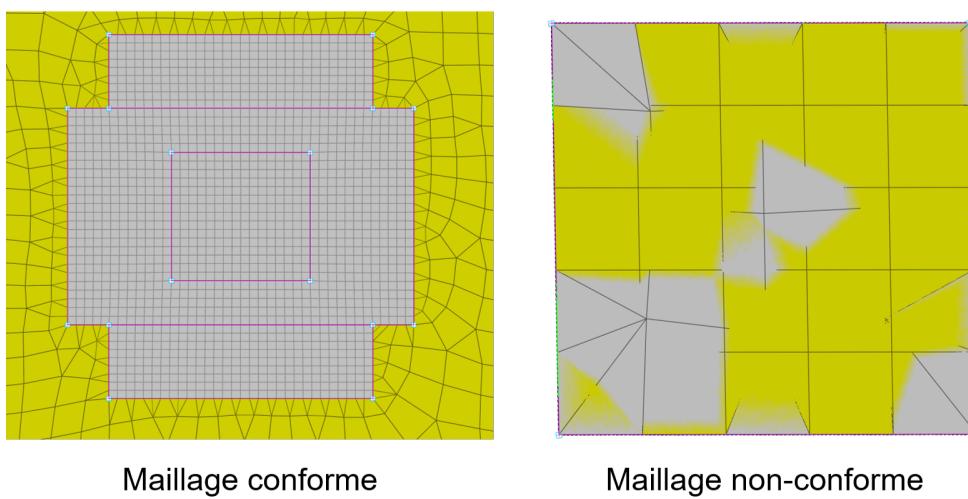


FIGURE 5.3 – Comparaison maillage conforme et non-conforme

L'export au format .cas est déjà implémenté dans ANSA puisque compatible avec Fluent. Cependant, l'export des réseaux CTM ne l'est pas car ils sont associés à des surfaces et non des volumes. Afin de connecter les CTM au reste du maillage (PCB ou structures voisines), il existe deux approches de maillage (cf figure 5.3) :

- conforme : Il décrit un maillage rigoureux où deux objets partagent une même face. Les éléments volumiques et surfaciques des deux objets sont connectés noeuds à noeuds.
- non-conforme : Il est possible, par exemple, que le maillage surfacique du PCB et celui d'un BOTTOM ne soient pas connectés noeud à noeud. Le solveur va alors gérer les échanges entre les deux surfaces (ici transfert thermiques conductif) par l'utilisation d'interface

5.2.2 Transfert des données des composants

Le maillage est exporté nativement par ANSA. Cependant, il manque les informations liées aux composants CTM qui permettent la simulation thermique de réseaux nodaux par le solveur. Pour cela, j'ai créé une macro qui va lire le fichier .cas créé par ANSA et le modifier en rajoutant les informations implémentées par l'utilisateur sur le projet. Et pour finir, cette macro fait un appel caché du solveur avec les paramètres rentrés dans le GUI d'export (cf figure 5.4).

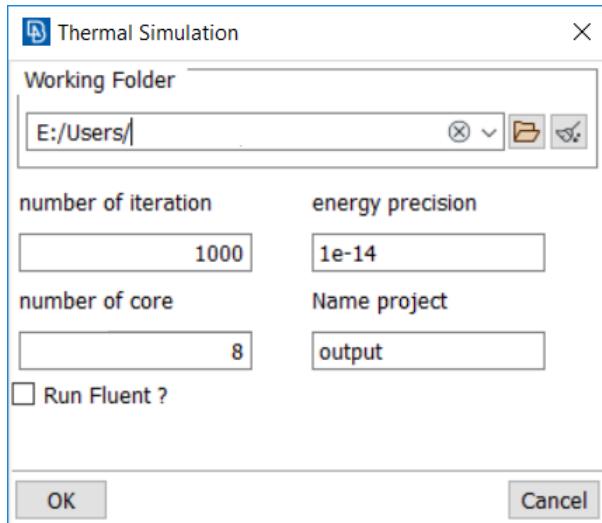


FIGURE 5.4 – Exemple de fenêtre de GUI : export

Cette nomenclature a été trouvée par rétro-ingénierie du .cas Fluent. Pour cela, des applications ont été effectuées sur des tests de petites tailles ainsi que de grand format. Cela a permis de mettre en avant des stockages au format hexadécimal de certains ID ou bien la déduction du calcul de certaines valeurs de résistance.

La première chose à ajouter au .cas sont les variables d'environnement du projet. Pour cela, ANSYS a choisi d'utiliser la balise 37, il est alors possible de paramétriser la température ambiante, les conditions limites, etc. Dans ce POC, la plupart des variables sont laissées par défaut. Le GUI donne la possibilité de modifier le critère de convergence sur l'équation de l'énergie ainsi que le nom du fichier d'export.

À cela, il faut ajouter les matériaux présents dans ce projet. La solution que j'ai programmée va détecter les faces et solides maillés et n'inclure que les matériaux nécessaires. Il est alors possible dans ANSA d'avoir une bibliothèque des matériaux à importer dans chaque projet afin de ne pas alourdir le fichier .cas.

Il faut ensuite déclarer toutes faces ou solides maillés (balise 39) selon leurs matériaux et s'ils font partis d'un CTM ou non. Toute face faisant partie d'un CTM doit être alors présente dans un réseau sous peine d'erreurs d'importation. En premier lieu, une lecture de l'export .cas d'ANSA est réalisée afin de relever chaque ID des faces maillées (qui correspond à leur PID dans ANSA) pour les associer au réseau correspondant.

Il reste à exporter les CTM ayant des noeuds externes maillés et ensuite rajouter les noeuds internes partageant un lien résistif avec eux. Pour cela, des dictionnaires ont été utilisés ainsi qu'une matrice pour représenter le réseau résistif.

En appliquant des masques à cette matrice, il est possible de désactiver des liens résistifs qui n'apparaissent alors plus dans l'export du .cas.

Il y a un changement d'unité à effectuer pour les valeurs de résistance entre chaque noeud qui passent de K/W à W/K/m². Il faut alors récupérer l'aire des faces dans ANSA pour transcrire les valeurs au bon format et à la bonne unité.

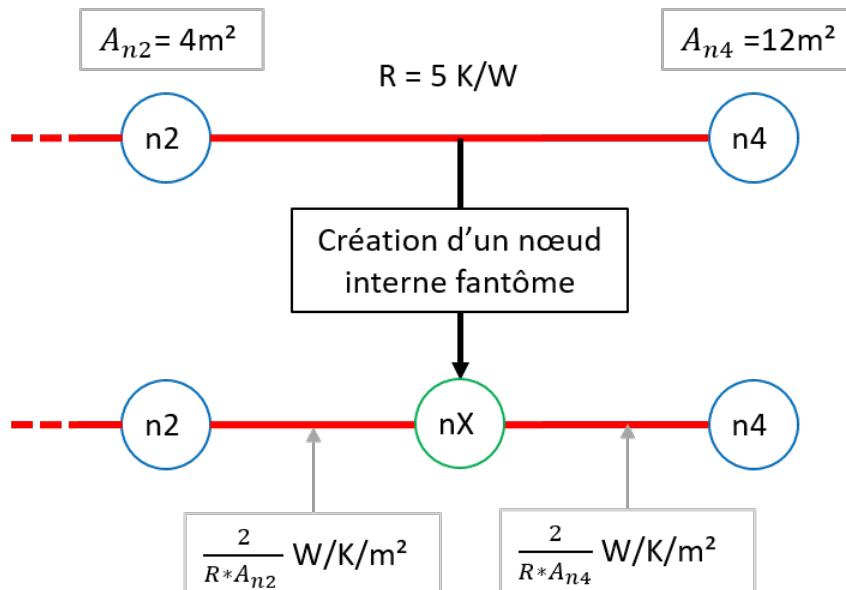


FIGURE 5.5 – Gestion des résistances entre 2 noeuds externes par la création d'un nœud fantôme

Des exceptions sont possibles. Par exemple, pour des résistances entre 2 noeuds externes, il est nécessaire de créer un noeud interne “fantôme”, lui associer la valeur résistive en lien avec la surface de chaque face externe et diviser par 2 la résistance de chaque côté (cf figure 5.5).

Chapitre 6

Simulation numérique : champ de température d'une carte électronique

Pour réaliser les simulations thermiques de PCB, le solveur de BETA CAE (EPILYSIS) n'a pas été choisi car il ne prend pas encore en compte la résolution de phénomènes thermiques. Ainsi, le solveur sélectionné est celui actuellement en place dans le processus actuel, il s'agit du solveur Ansys Fluent.

6.1 Choix du solveur : Fluent

Fluent a été conservé car il est considéré efficace par sa possibilité de calculer en parallèle ainsi que de définir le nombre de cœurs à affecter. Cela permet aussi de garder une continuité dans les résultats de simulation en ne devant pas valider les calculs d'un nouveau solveur.

6.1.1 Avantages

Ce logiciel de simulation de fluides (CFD) permet de simuler le comportement d'un large éventail d'écoulements tel que newtoniens/non newtoniens, monophasiques/multiphasiques ou bien subsoniques/hypersoniques.

Multi-physique

Pour obtenir les meilleures simulations, les ingénieurs ne peuvent plus se contenter d'analyser un seul type de physique (fluides, structure ou électromagnétisme). Au lieu de cela, ils doivent étudier plusieurs types de physique ainsi que leurs interactions.

Il est alors possible de coupler Fluent avec d'autres outils de simulation de l'éditeur Ansys, tel que de mécanique structurelle ou d'électromagnétisme pour obtenir une vue d'ensemble du système. Par exemple, il est possible d'étudier comment l'écoulement d'un fluide sur une structure peut la déformer ou comment la chaleur générée par un composant électronique affecte la température des fluides.

Parallélisation

Une telle amélioration de la résolution nécessite plus de ressources de calcul se traduisant par la parallélisation des calculs. Les capacités de mise à l'échelle sur plusieurs coeurs de Fluent permettent d'apater les calculs sur différentes machines ou serveurs de calcul selon leur capacité. Fluent ajuste automatiquement la distribution des cellules de calcul entre les différents processeurs afin de maximiser la vitesse de calcul.

6.1.2 Inconvénients

Dans le processus actuel, Icepak n'utilise pas Fluent juste en tant que solveur. Il est possible que le maillage généré par Icepak ne soit pas compatible avec les critères de qualités propres à Fluent.

Le maillage Icepak est une première fois exporté au format Fluent ".cas". Fluent importe ce maillage et y apporte des modifications. Ce nouveau maillage nettoyé est de nouveau enregistré dans un .cas, prêt à être résolu par Fluent. Toutes ces étapes sont stockées dans une routine écrite dans un fichier batch (.bat). Ce fichier permet aussi de faire appels à des librairies Icepak afin de lire et appliquer le metal fraction sur les PCB ou encore d'enregistrer les température des noeuds Jonction (Tj) de chaque réseau CTM présent dans le modèle.

Toutes les opérations réalisées dans cette routine sont masquées à l'utilisateur. Elles sont exécutées en arrière plan. Les rapports générés lorsqu'une erreur est rencontrée ne sont pas assez détaillés pour permettre à l'utilisateur de facilement corriger le problème.

6.1.3 Intégration au nouveau processus

Le nouveau processus évalué permet d'obtenir un maillage de meilleure qualité, il reste à créer des fonctionnalités de post traitement des résultats, spécifiques au PCB. L'utilisation d'un .bat simplifié et inspiré de celui créé par la routine de simulation d'Icepak permet toujours d'appeler les librairies Icepak nécessaires. Pour le maillage, il existe des outils de validation et vérification dans Fluent avant le lancement du calcul afin de s'assurer de sa conformité. À terme, ces routines seront remplacées par celles créées par BETA, ainsi le processus ne sera plus dépendant d'Icepak.

L'outil Fluent a pour objectif de seulement exécuter des algorithmes sur des maillages selon des variables d'environnement. Il est donc possible de modifier l'environnement ainsi que les méthodes algorithmiques utilisées mais toutes les informations liées au maillage ainsi qu'aux réseaux résistifs ne sont plus accessibles.

Il est envisageable alors d'exécuter cette étape en arrière-plan sans aucune interface. Il suffit alors de renseigner les conditions d'environnement dans le .cas et de faire un appel de commande du .bat.

6.2 Résultats

Il a été décidé d'évaluer ce POC pour 2 types de simulations :

- D'abord sur un modèle avec un seul composant ne dissipant de la chaleur que vers le PCB. Sur ce test, les valeurs théoriques ont été calculées puis des modèles Icepak et ANSA ont été simulés. Le maillage est identique entre les 2 logiciels.
- Le second test est réalisé sur le PCBA présenté jusqu'à maintenant avec un refroidissement liquide (représenté par une structure avec une plaque froide). Cette structure est en contact au sommet des composants. Une comparaison entre Icepak et ANSA est faite selon différentes tailles de maillage, afin d'assurer une indépendance des résultats au maillage.

Ces tests ne prennent pas en compte le Metal Fraction mais un exemple avec Metal Fraction et refroidissement par un flux d'air circulant sur des composants équipés de structures en ailettes est disponible en annexe A.

6.2.1 Simulation d'un seul composant

La première étape de validation est effectuée sur un exemple simple. Les températures sont d'abord estimées par le calcul analytique pour ensuite les comparer à celles obtenues par les deux processus de simulations.

Pour cela, un modèle est créé pour représenter un seul composant sur un PCB simplifié évacuant la chaleur dissipée par sa face reliée au PCB. Le composant est représenté par un réseau thermique nodal. Le PCB est fixé à une plaque d'aluminium. L'évacuation de la chaleur est assurée par un échange convectif en contact avec cette plaque. De par sa conception, le flux de dissipation thermique est dirigé sur un seul axe (axe z) afin de simplifier les calculs (cf tableau 6.1 et figure 6.1).

Composant :	
Puissance dissipée (Φ)	10 W
Résistance vers le BOTTOM (R_{TH})	2 K/W
PCB	
Epaisseur (e_{PCB})	$5 \cdot 10^{-3}$ m
Conductivité thermique (λ_{PCB})	5 W/m.K
Aluminium	
Epaisseur (e_{Alu})	$2 \cdot 10^{-3}$ m
Conductivité thermique (λ_{Alu})	167 W/m.K
Structure de refroidissement	
Température du liquide ($T_{LIQUIDE}$)	293.15 K
Convectivité thermique ($h_{cooling}$)	200 W/m ² .K
Surface d'échange	$1.6 \cdot 10^{-3}$ m ²

TABLE 6.1 – Données du modèle théorique

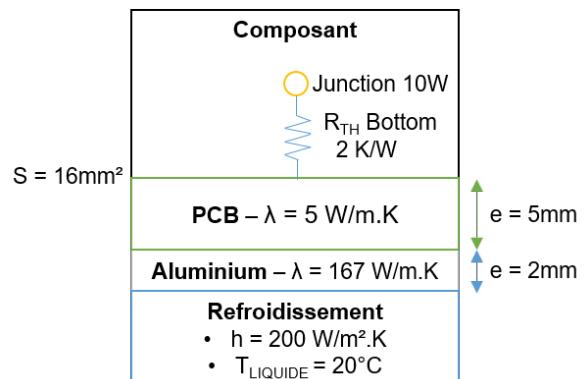


FIGURE 6.1 – Schéma du modèle théorique

Résultat théorique :

Pour calculer la valeur du T_j de ce composant, il faut partir de la structure de refroidissement. Il est alors possible de déterminer la température de surface de l'aluminium par échange convectif (d'après l'équation 3.4 partie 3.1.3) :

$$\Delta T = \frac{\Phi}{h_{cooling} \times S} = \frac{10}{200 \times 1,6 \cdot 10^{-3}} = 31,25 \quad (6.1)$$

$$T_{Alu/LIQ} - T_{LIQUIDE} = 31,25 \quad (6.2)$$

$$T_{Alu/LIQ} = 324,40 K \quad (6.3)$$

Il est désormais possible de calculer l'échauffement dans la plaque d'aluminium et le PCB. Ces échauffements sont caractérisés par un échange par conduction (voir l'équation 3.2 partie 3.1.3) des différentes couches de matériaux, en commençant par les 2mm d'aluminium :

$$\Delta T_{Alu} = \frac{\Phi \times e_{alu}}{\lambda_{alu} \times S} = \frac{10 \times 2 \cdot 10^{-3}}{167 \times 1,6 \cdot 10^{-3}} = 0,075 \quad (6.4)$$

$$T_{Alu/LIQ} - T_{Alu/PCB} = 0,08 \quad (6.5)$$

$$T_{Alu/PCB} = 324,48 K \quad (6.6)$$

En considérant que $T_{Alu/PCB} = T_{PCB/Alu}$, il est possible de calculer la conduction dans le PCB :

$$\Delta T_{PCB} = \frac{\Phi \times e_{PCB}}{\lambda_{PCB} \times S} = \frac{10 \times 5 \cdot 10^{-3}}{5 \times 1,6 \cdot 10^{-3}} = 6,25 \quad (6.7)$$

$$T_{PCB/BOT} - T_{PCB/Alu} = 6,25 \quad (6.8)$$

$$T_{PCB/BOT} = 330,73 K \quad (6.9)$$

La face BOTTOM du composant est considérée égale à celle du PCB, soit 330,73K (57,58°C). Pour connaître alors la température au point interne Jonction (T_j), il faut alors additionner le ΔT généré par la résistance R_{TH} . Cette valeur est égale à :

$$\Phi = \frac{1}{R_{TH}} \times (T_j - T_{BOTTOM}) \quad (6.10)$$

$$T_j = \Phi \times R_{TH} + T_{BOTTOM} \quad (6.11)$$

$$= 10 \times 2 + 330,73 K \quad (6.12)$$

Une fois l'état stationnaire atteint, la température de Jonction (T_j) enregistrée du composant est de 77,58°C pour une puissance dissipée de 10W. Au sein du composant, le gradient entre la jonction et la surface BOTTOM est de 20°C (cf figure 6.2).

A travers le PCB, l'élévation de température est de 6,25°C. Dans l'aluminium, le gradient est de 0,08°C grâce à sa conductivité élevée (167W/m.K). Cet exemple montre l'importance du choix des matériaux pour optimiser les échanges thermiques.

Pour un refroidissement avec une température de référence à 20°C, la température de surface de l'aluminium s'élève à 51,25°C.

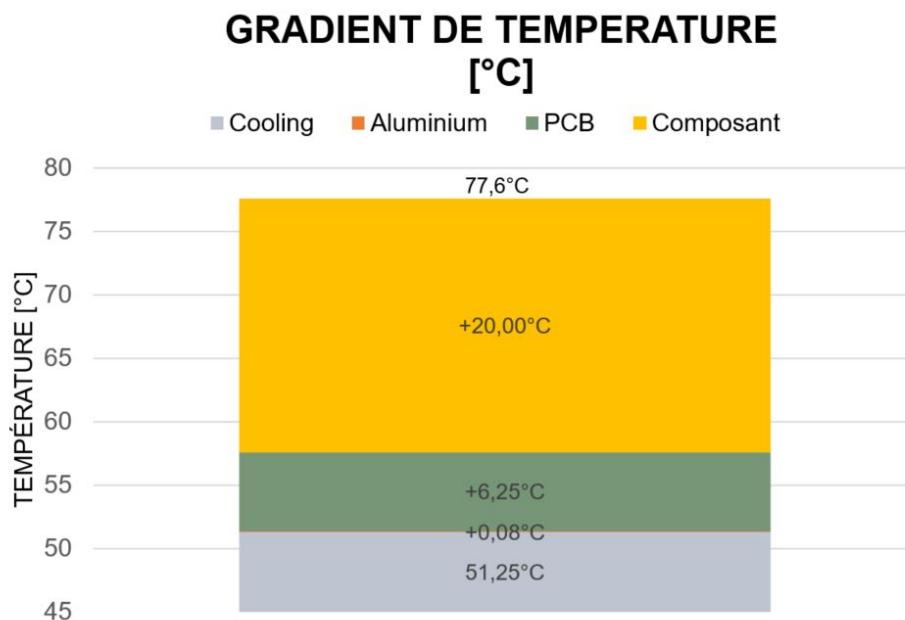


FIGURE 6.2 – Graphique des températures selon l'épaisseur (z) dans le modèle et leur structure

Résultat Icepak et ANSA :

Le modèle précédemment décrit est reproduit dans les deux logiciels de mise en calcul, avec un maillage identique (hexaèdres 1,0*1,0*0,4m). Cela correspond à un maillage de 28800 éléments volumiques régulier et uniforme sur tout le modèle.

Il faut ensuite associer les matériaux selon la physique précédemment définie afin d'obtenir une diffusion du flux de chaleur principalement selon l'axe z.

Les .cas générés par les 2 logiciels sont ensuite simulés dans Fluent avec un critère de convergence identique. Les champs de température obtenus étant uniformes dans le plan xy, le gradient de température est observable selon z. Les points d'intérêt se situent aux frontières entre 2 matériaux différents ainsi que la T_j¹ (cf tableau 6.2 et figure 6.3).

		Analytique	Icepak	ΔT	ANSA	ΔT
Composant	T _j BOTTOM	77,58	77,58	0,00	77,58	0,00
		57,58	57,58	0,00	57,58	0,00
PCB	HAUT	57,58	57,57	-0,01	57,44	-0,14
	BAS	51,33	51,33	0,00	51,46	0,13
Aluminium	HAUT	51,33	51,33	0,00	51,32	-0,01
	BAS	51,25	51,25	0,00	51,25	0,00
Cooling		51,25	51,25	0,00	51,25	0,00

TABLE 6.2 – Les températures aux frontières des matériaux

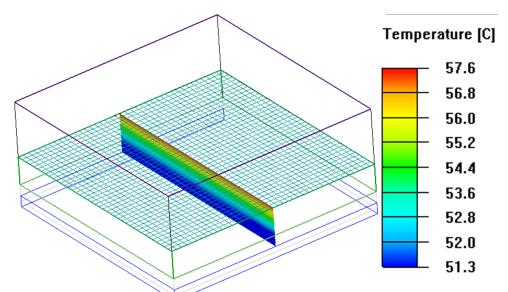


FIGURE 6.3 – Coupe vertical et ses températures associées

1. température de Jonction

Des différences apparaissent entre les 2 simulations notamment dans le PCB. Néanmoins la valeur de T_j du composant est identique entre calcul analytique et les deux processus (cf figure 6.4).

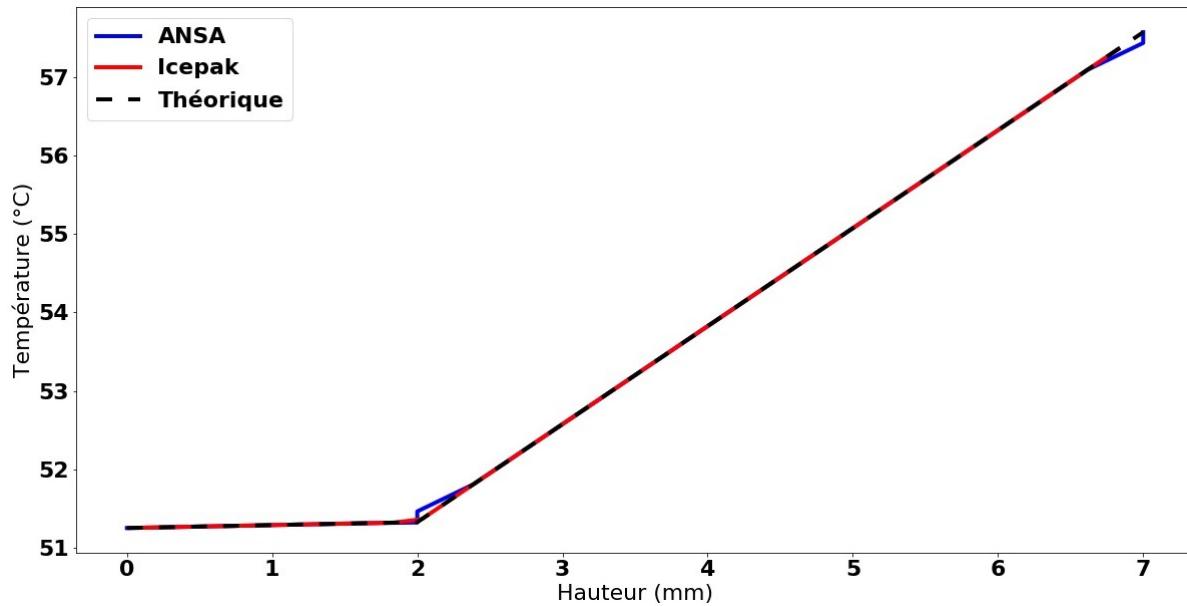


FIGURE 6.4 – Graphique des températures selon l'épaisseur (z) pour chaque processus

Les résultats étant validés, l'application du nouveau processus à une échelle supérieure est réalisée.

6.2.2 Simulation de la carte électronique refroidie par liquide

Cette simulation thermique de PCBA est refroidie par des structures à une température constante (assimilable à un refroidissement liquide). Cela va permettre de valider que le processus est équivalent à celui actuel pour un PCBA contenant plusieurs composants.

Pour un souci de confidentialité, un exemple basé sur un projet concret ne peut être présenté. Pour cela une carte dite "test" a été créée spécialement pour ce stage. J'ai sélectionné les caractéristiques du PCB ainsi que les composants équipés (tous disponibles dans le commerce). L'équipe Mécanique a créé la forme générale du PCB selon les instructions avec l'emplacement des vis de fixation. Celle de Circuit Imprimé a placé les composants comme souhaités et créé les pistes de cuivre ainsi que les différentes couches du PCB.

L'objectif de ces tests est de montrer que l'interaction des composants entre eux est reproduite de façon identique avec les deux processus. Comme le maillage influe sur la précision de simulation ainsi que le résultat des calculs, une étape de comparaison sur iso-maillage est nécessaire.

Résultat de référence :

Le maillage d'Icepak est paramétré pour obtenir des hexaèdres d'1mm de coté et 0.5mm de hauteur pour les structures et de grandes tailles. Il est nécessaire de raffiner ce maillage sur les éléments de plus petites échelles tels que les composants. La taille des mailles est alors de 200 microns voir 100 microns (cf figure 6.5).

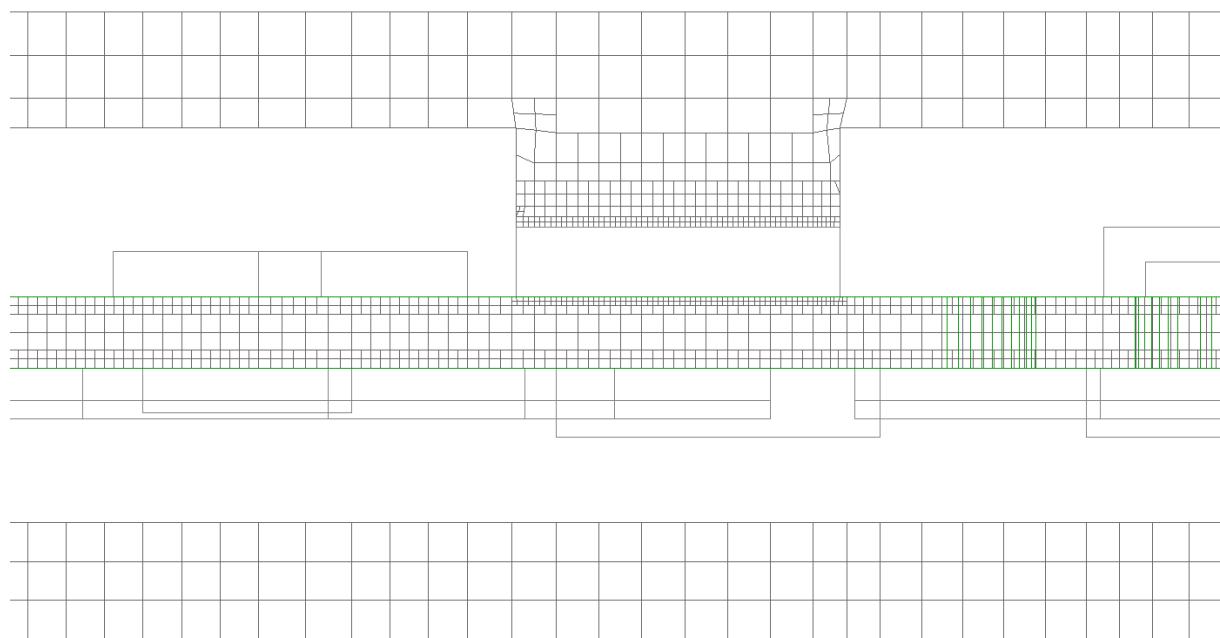


FIGURE 6.5 – Coupe du maillage d'Icepak sur un composant

Après simulation thermique dans Fluent, la plage de température du PCB obtenue est de 40.7°C à 69.5°C, présenté en figure 6.6. Un échauffement local du PCB observable aux alentours de 62,3°C due à la concentration de composants et donc de puissances dissipées.

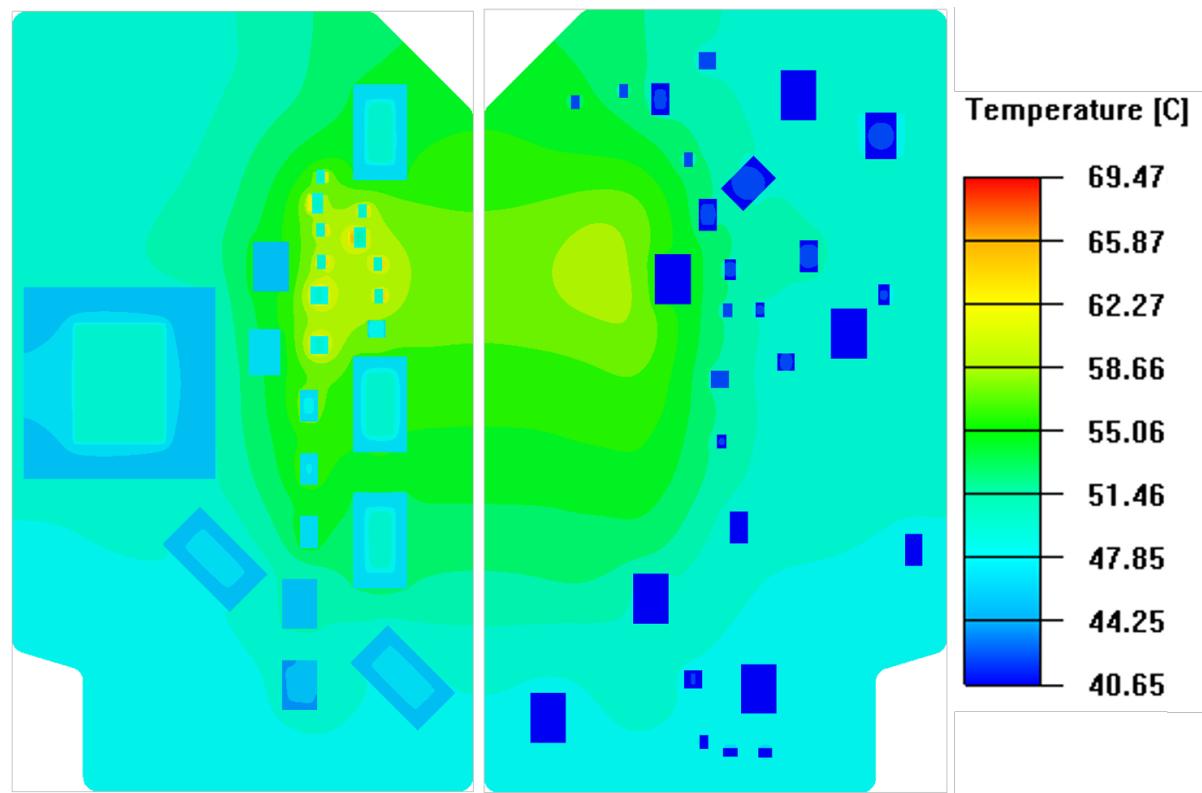


FIGURE 6.6 – Champ de température simulé sur le maillage d'Icepak

Les T_j des différents composants varient sur une plage comprise entre 46.2°C et 75.6°C. Ce PCB test représente le comportement d'une carte d'un système de défense en fonctionnement nominal non contraint.

Résultat nouveau processus :

Le cas de référence étant établi dans Icepak avec l'ancien processus, il faut désormais arriver à recréer un maillage similaire dans ANSA. Pour cela, les paramètres de maillage utilisés dans ANSA sont similaires : mailles hexaédriques de 0,5mm pour les structures, entre 100 et 200 microns pour les composants (cf figure 6.7).

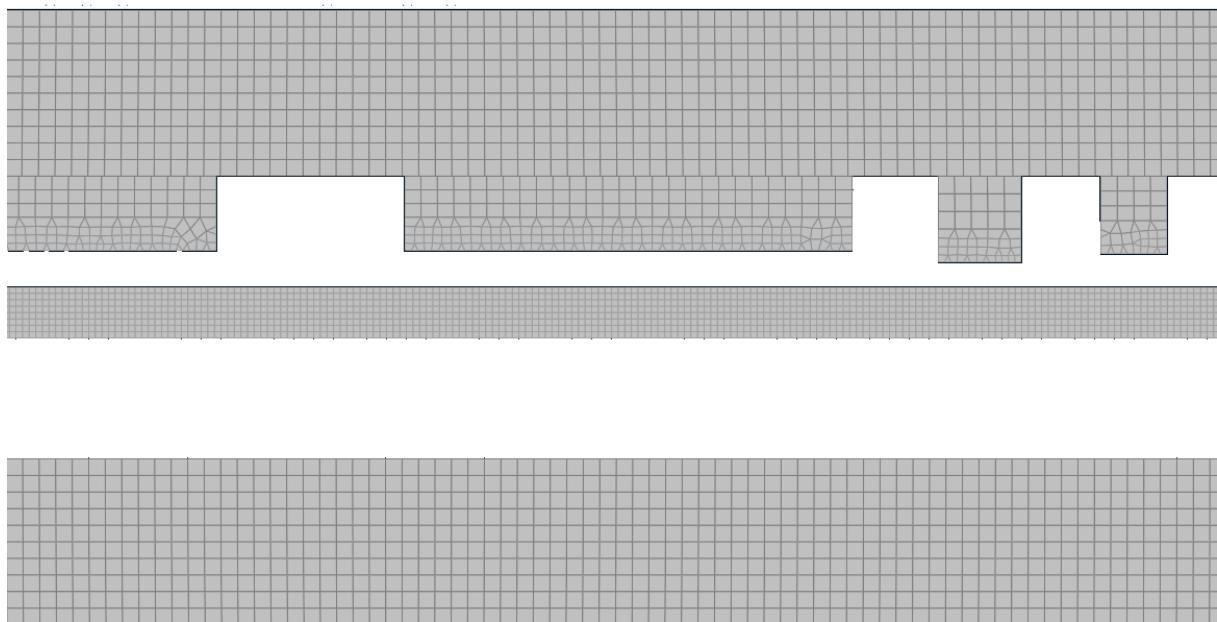


FIGURE 6.7 – Vue latérale du maillage d'ANSA

Après simulation thermique dans Fluent, les températures obtenues varient selon une échelle allant de 40,68°C à 65,81°C. Le champ thermique est visuellement similaire au cas de référence. Un échauffement du PCB comparable au précédent cas est observée (cf figure 6.6).

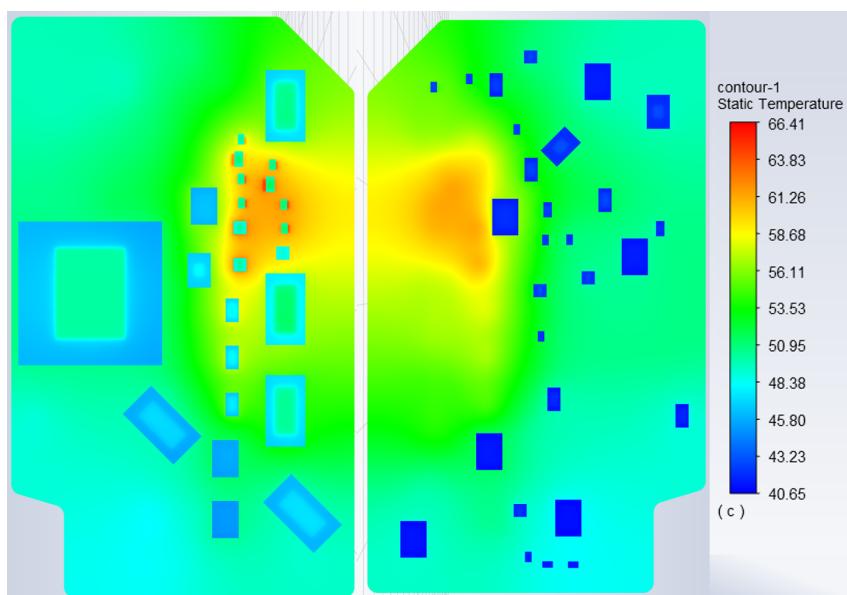


FIGURE 6.8 – Champ de température simulé sur le maillage d'ANSA

Résultat iso-maillage :

Afin de pouvoir comparer les 2 champs thermiques en limitant l'influence du maillage, j'ai créé un programme d'interpolation des résultats de chaque logiciel sur un maillage uniformément maillé à 10 microns. Les résultats sont projetés sur l'iso-maillage par interpolation linéaire.

Il est alors possible de représenter la différence entre les 2 maillages comme présenté en figure 6.9. Cette interpolation met en évidence une différence d'un maximum de +3°C pour les résultats Icepak par rapport à ceux de ANSA. Cette différence est principalement observable sur les faces INNER_BOTTOM de deux composants, situés dans la zone "d'échauffement" du PCB. En se concentrant sur un des composants problématiques, L'écart entre les deux calculs se limite à la face dite INNER_BOTTOM du composant.

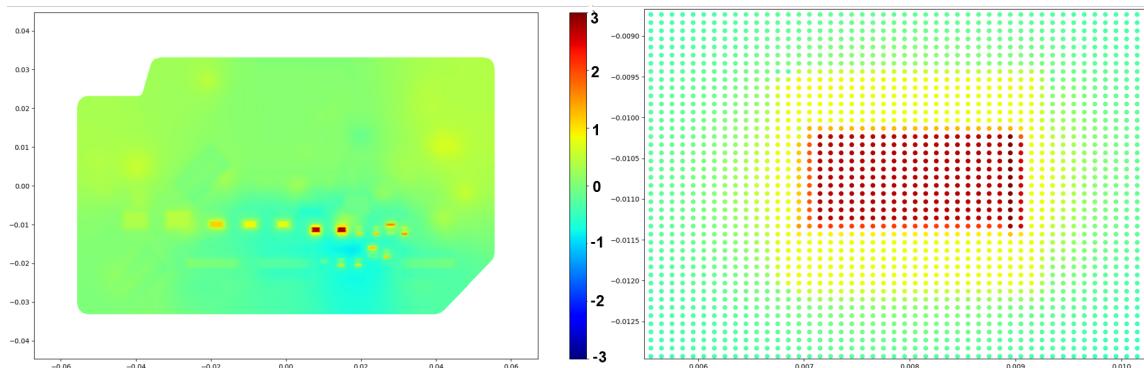


FIGURE 6.9 – Champ des différences de températures entre Icepak et ANSA

La section 6.2.1 a mis en évidence que pour un cas simple à iso-maillage, les résultats Icepak et ANSA sont identiques. Les différences observées pour ce premier cas test laissent donc penser que le maillage est responsable de ces écarts. Il est donc nécessaire d'effectuer une sensibilité au maillage de ce cas test.

Malgré l'utilisation de critères de maillage identique, les deux maillages générés présentent des différences (voir figure 6.5 et 6.6). Le maillage généré par ANSA est uniforme dans le PCB alors que celui d'Icepak présente un critère de grossissement dans ses couches centrales. Un nouveau maillage Icepak a été généré, en affinant le PCB localement dans le but de se rapprocher du maillage ANSA (cf figure 6.10).

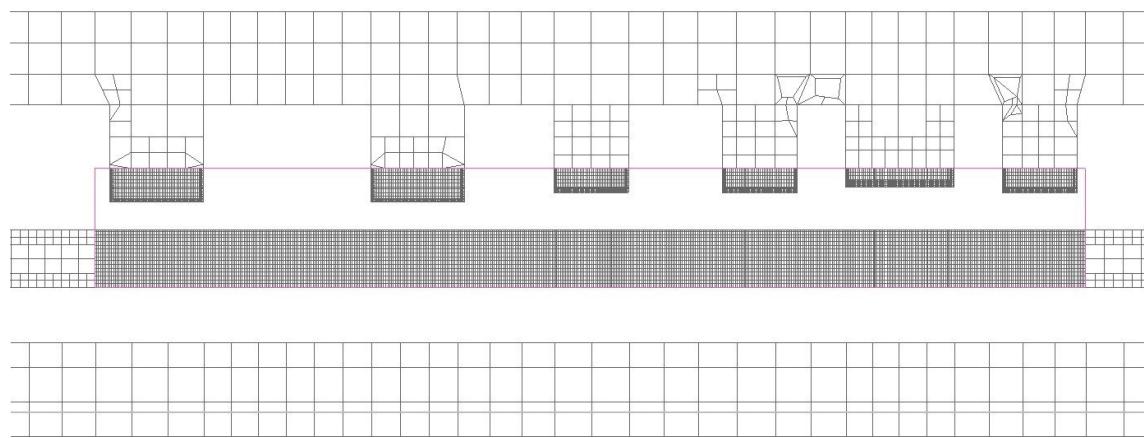


FIGURE 6.10 – Coupe du nouveau maillage amélioré d'Icepak

Avec un maillage régulier d'éléments hexaédriques de 50 microns, l'écart maximal entre les deux résultats se réduit, passant de $+3^{\circ}\text{C}$ à $+2^{\circ}\text{C}$. (cf figure 6.11). Cela démontre que la fidélité et la convergence des résultats sont directement impactées par le maillage.

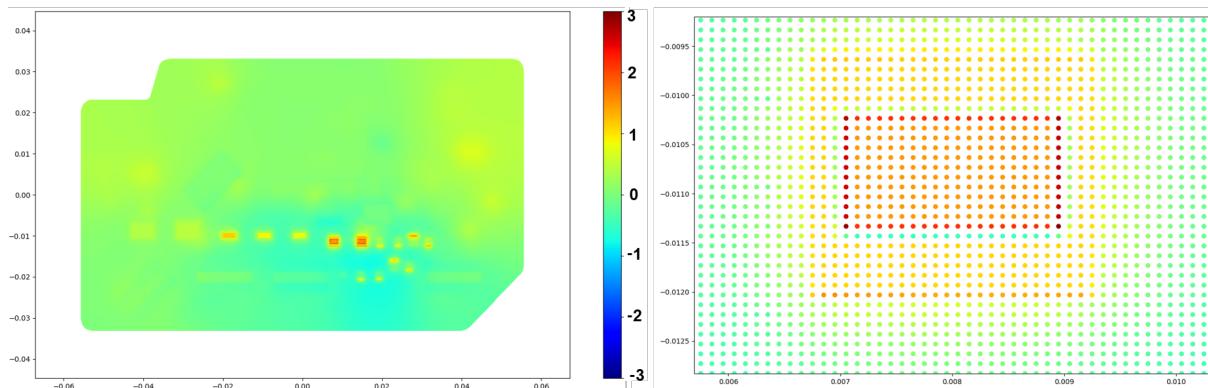


FIGURE 6.11 – Champ des différences de températures entre ANSA et le maillage à 50 microns d'Icepak

Si la taille des éléments du maillage d'Icepak continue d'être réduite, la différence entre les 2 champs est alors inversée et l'écart maximale entre les deux résultats passe de $+2^{\circ}\text{C}$ à -2°C (cf figure 6.12).

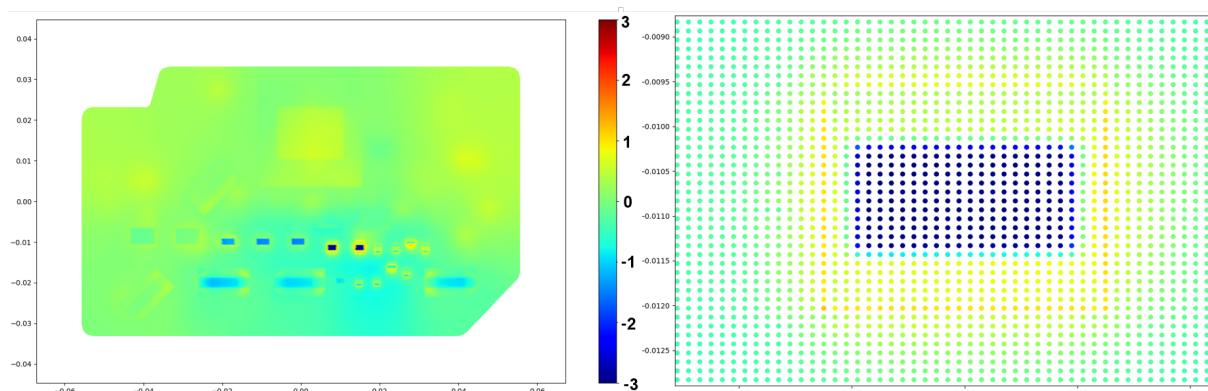


FIGURE 6.12 – Champ des différences de températures entre le nouveau maillage Icepak et ANSA

Ces différents tests permettent de mettre en avant deux points :

- le maillage joue un rôle déterminant sur les résultats obtenus. Pour aller plus loin dans la démarche, d'autres maillages ANSA et Icepak doivent être comparés afin de trouver le critère de maillage n'influencant plus les résultats (indépendance au maillage).
- malgré les écarts observés, les résultats obtenus sur les différents test Icepak/ANSA se situent sur une même plage de température. Les résultats obtenus par le nouveau processus ANSA sont cohérents avec le processus actuel et permettent de valider l'implémentation de mes travaux.

Chapitre 7

Conclusion

Au travers de ce stage, l'étude de faisabilité d'implémentation d'un nouveau processus de simulation thermique de cartes électroniques a été réalisée ainsi que la création des 3 passerelles permettant le calcul de premiers résultats.

La mise à jour de la base de données interne Thales, contenant les modélisations des composants et leur CTM, est testée et validée. Il est possible d'utiliser des fichiers au format JEP30 et d'obtenir des résultats conformes à ceux obtenus jusque là.

Il est désormais possible d'importer des réseaux nodal thermique dans ANSA, grâce à des programmes Python basés sur les librairies propres du logiciel. Les informations de ces réseaux importés sont consultables et modifiables par l'utilisateur (géométrie, réseau résistif et puissance). La paramétrisation et la mise en calcul de cartes complexes est simplifiée par la création d'utilitaires pouvant manipuler efficacement les données de chaque composants.

Une fois la mise en calcul dans ANSA terminée, l'export au format .cas du solveur Fluent a été modifié afin d'intégrer les réseaux résistifs des composants. Ce fichier respecte les attentes du solveur et contient les informations permettant d'initialiser l'environnement de simulation et son lancement.

Pour valider ce nouveau processus, des tests ont été effectués. Les champs de températures obtenus sont comparés avec le calcul analytique ou ceux du processus actuel qui servent alors de référence. Les comparaisons mettent cependant en avant la sensibilité de la validation du nouveau processus à la précision du maillage.

Il reste encore des ajouts essentiels à réaliser tel que l'utilisation du Metal Fraction afin de modéliser fidèlement les flux thermique suivant les pistes de cuivres dans le PCB. Il serait intéressant de réaliser des simulations couplées fluide/structure pour prendre en compte la convection forcée autour des composants (maillage des volumes fluides). Aujourd'hui, les tests effectués se limitent à des simulations par conduction seule. THALES DMS souhaiterait également ajouter la possibilité de remplacer des composants directement dans ANSA par des modèles résistifs 2R. Cette nouvelle fonctionnalité permettrait de simplifier et accélérer la mise en calcul des PCB pour la simulation thermique.

Bien que fonctionnelles et validées, les solutions proposées sont temporaires et servent de preuves de faisabilité en se limitant à un cas particulier. Il faudrait alors, dans le futur, les implémenter de façon définitive en les optimisant. Les équipes de BETA travaillent sur la version définitive de l'implémentation des réseaux nodaux dans ANSA. Cette solution sera robuste et répondra aux différents scénarios et demandes de l'utilisateur.

Un dernier travail consiste à présenter à la fin du stage les dernières avancées de ce POC aux autres entités Thales. Ces derniers décideront de la pertinence de ce choix de solution logicielle pour le maillage et la simulation de réseaux thermiques nodaux.

Annexe A

Simulation de la carte électronique refroidie par air

Dans le but de présenter les nouvelles fonctionnalités d'ANSA sur l'import de PCB et le calcul du metal fraction, une simulation thermique conjointe BETA/Thales a été réalisée. J'ai fourni avec l'aide de mon maître de stage, le modèle de PCBA présenté dans la partie 6.2.2 ainsi que les ailettes de refroidissement des composants et le boîtier. Ce boîtier est traversé par un flux d'air afin d'évacuer les puissances dissipées par les composants (cf figure A.1).

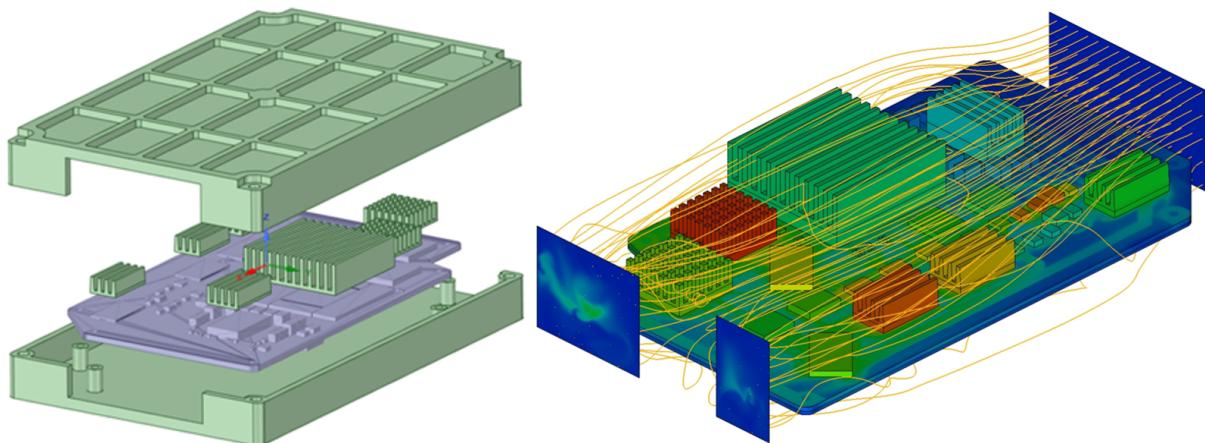


FIGURE A.1 – Passage de l'air pour le refroidissement

La modélisation de simulation a été réalisée entièrement avec l'outil ANSA. La carte électroniques et les différents éléments de structures ont été importés puis modifiés. Les propriétés des matériaux ainsi que les puissances dissipées ont été assignées dans ANSA. Les résultats obtenus ont été présenté à une conférence et ont servi en interne des deux entreprises pour présenter l'avancée des travaux.

À travers ces simulations, le lien entre Metal Fraction et le champ de température est mis en avant. Sur la face TOP du PCB (cf figure A.2), les pistes et inscriptions constituées de cuivre apparaissent distinctement sur la simulation. Ces détails sont en lien avec leur représentation dans le Metal Fraction lié au modèle de PCB. Cela s'explique car les flux thermiques parcourant le chemin ayant la meilleure conductivité, ici le cuivre par rapport au diélectrique.

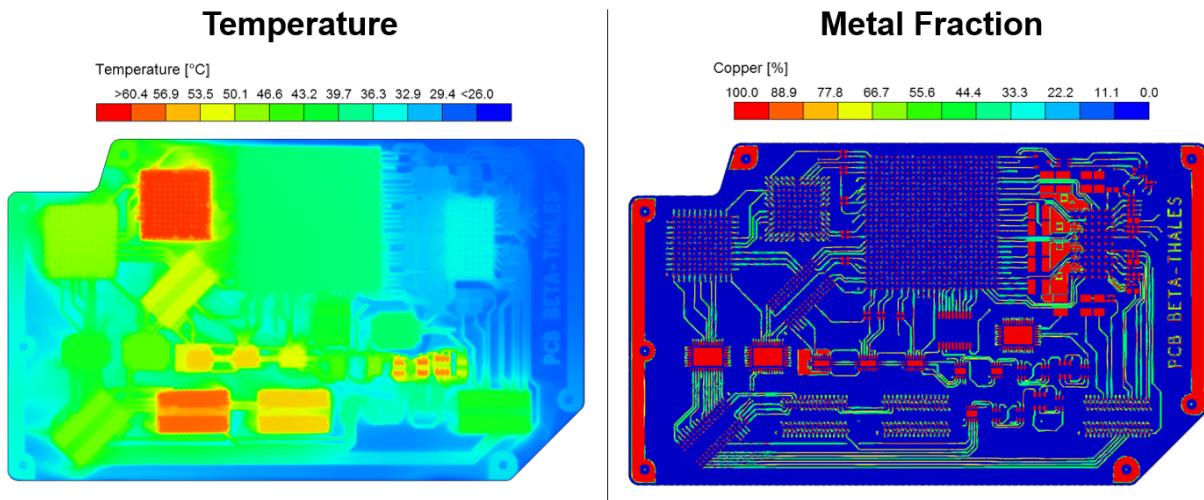


FIGURE A.2 – Correlation entre champ de température et Metal Fraction sur la face TOP

Les couches du PCB sont reliées entre elles par les vias. Ces derniers sont également pris en compte dans le Metal Fraction et permettent un échange thermique entre les couches. Dans le cas d'une couche interne de masse constituée principalement de cuivre, la puissance dissipée est plus facilement répartie et la température plus homogène.

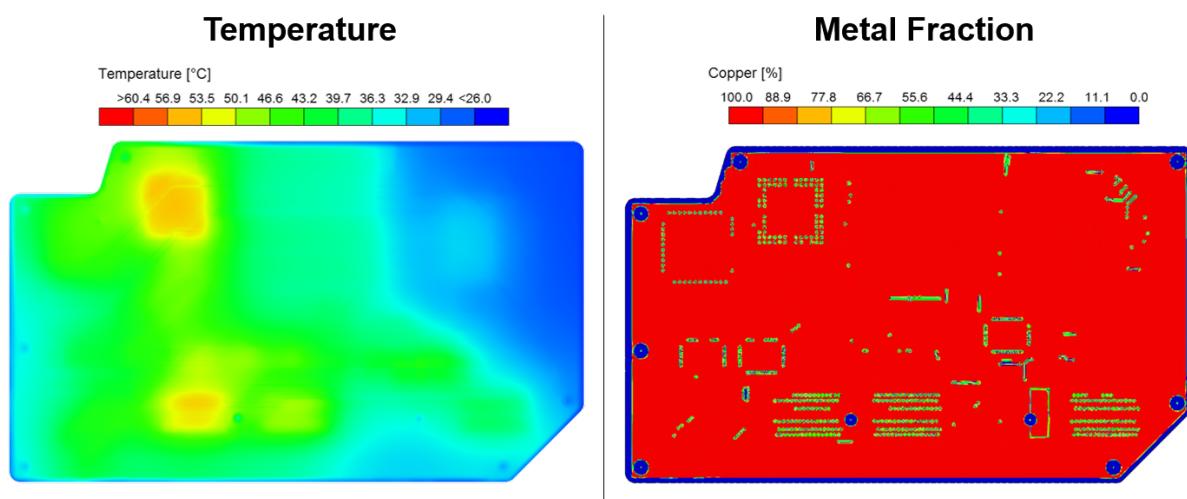


FIGURE A.3 – Correlation entre champ de température et Metal Fraction sur la couche de masse

Grâce aux différentes options disponibles dans le logiciel de post-traitement META de BETA, il est possible de visualiser le champ de vitesses du flux d'air permettant l'explication de certains résultats sur le champ de température. Par exemple, le composant 1 (cf figure A.4) a une température estimée de 60°C car le flux d'air qui le traverse a été ralenti et pollué par les composants en amont. Principalement due à un composant 2 dont le sens de ces ailettes dévie le flux.

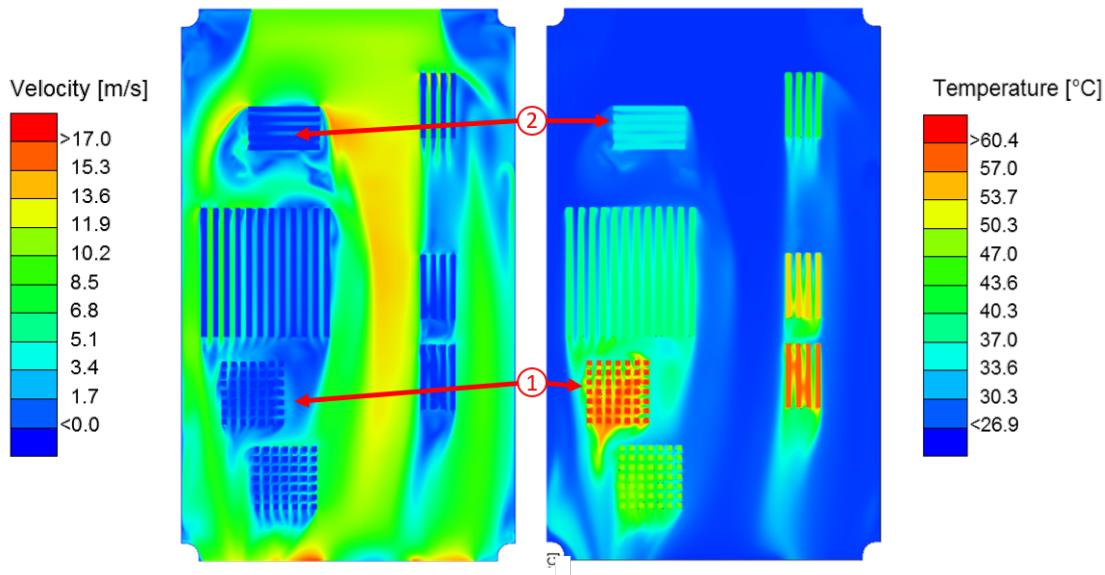


FIGURE A.4 – Comparaison entre vélocité de l'air et champ de température

Cette simulation met en avant l'attrait et les capacités des solutions logicielles de BETA CAE pour répondre aux attentes en termes de simulation thermique sur les produits Thales.

Annexe B

Bibliographie

- [1] Sparkfun. Integrated circuits. (consulté le 07/2023) <https://learn.sparkfun.com/tutorials/integrated-circuits/inside-the-ic>.
- [2] Jean-Pierre PETIT. Dissipation thermique dans les systèmes électroniques, Février 2001. (consulté le 06/2023).
- [3] Jean-Martial COHARD. Transfert thermique, 2002. (consulté le 07/2023).
- [4] LUSAC AREELIS Technologies. Dissipation thermique dans les composants/systemes electroniques, Juillet 2015. (consulté le 06/2023) https://www.nae.fr/wp-content/uploads/2015/07/Etude_DissipationThermique.pdf.
- [5] Valérie R. Formation circuits imprimés. Support de formation interne THALES TDM-SFR_63888296 (consulté le 06/2023).
- [6] Cheikh Tidiane DIA. Génération de modeles compacts thermiques dynamiques de composants electroniques via les algorithmes genetiques, Décembre 2015. (consulté le 07/2023).
- [7] ANSYS. ANSYS Icepak user's guide. (consulté le 03/2023).
- [8] JEDEC. JEP30-T100A - part model thermal guidelines for electronic-device packages – xml requirements, Mars 2023. (consulté le 03/2023).
- [9] BETA. Getting started. (consulté le 04/2023).
- [10] BETA. ANSA API user guide. (consulté le 04/2023).

Glossaire

2R Modèle de CTM simplifié ne contenant que le noeud Jonction ainsi que les faces TOP et BOTTOM. Utilisé principalement pour les composants à peu d'importance

ANSA Logiciel de BETA permettant la création et la manipulation d'un maillage, ainsi que de multiples autres fonctionnalités

AVS Avionique (*Avionics*), entité THALES qui fournit divers systèmes de bord, des solutions d'entraînement et de simulation pour les forces terrestres, aériennes et interarmées, ainsi que des sous-systèmes d'imagerie et d'hyperfréquences.

AWS Systèmes Navires de Surface (*Above Water Systems*), BL de THALES DMS qui propose des systèmes de gestion de combat apportant au commandement d'un navire un contrôle absolu par l'intégration de tous les senseurs, systèmes de mission et d'armement

BACK Paroi latérale d'un composant

BE Bureau d'Études

BGA Matrice de billes (*Ball Grid Array*) est un boîtier de composant qui est relié au PCB grâce à des billes de soudure

BL Business Line, correspond à un secteur d'activité qui regroupe des services et des produits qui ont une utilité commune

BOTTOM Couche la plus en dessous d'un assemblage

CAE Ingénierie assistée par ordinateur (*Computer Aided Engineering*)

CAO Conception Assistée par Ordinateur

CC IM Centre de Compétence Ingénierie Matériel

CFD Simulation de fluides (*Computed Fluid Dynamics*) consiste à étudier les mouvements d'un fluide, ou leurs effets, par la résolution numérique des équations régissant les fluides telle que celle d'Euler, Navier-Stokes, etc.

CPU Processeur (*Central Processing Unit*) est un composant qui exécute les instructions machine des programmes informatiques

C.S.F Compagnie Générale de Télégraphie Sans Fil. créée en 1918 est une entreprise pionnière dans les transmissions hertziennes, co-fondateur du groupe Thomson-CSF qui deviendra le groupe THALES

CSV Format de fichier contenant un tableau dont les colonnes sont séparées par des ";"

CTM Modèle thermique compact (*Compact Thermal Model*) est un modèle mécanique simplifié d'un composant avec des propriétés thermiques, de sorte qu'on peut prédire une température de jonction précise avec une distribution uniforme de la puissance pour chaque puce.

DELPHI Modèle de CTM contenant un noeud Jonction ainsi que toutes les faces représentant un échange thermique avec son environnement

diélectrique Matériau ne possédant pas d'électrons libres capables de transporter un courant électrique, mais qui peut être polarisé par un champ électrique. Une partie de l'énergie de ce champ est perdue dans le diélectrique et apparaît sous forme de chaleur.

DIS Identité et sécurité numériques (*Digital Identity and Security*), entité THALES permettant aux entreprises et aux gouvernements d'authentifier les identités et de protéger les données afin de rester en sécurité sur les objets connectés, le cloud et entre les deux.

DMS Systèmes de mission de défense (*Defence Mission Systems*), entité THALES qui fournit des équipements, des solutions et des services liés aux systèmes de combat électroniques, de surveillance et de reconnaissance, de combat naval de surface et de lutte sous la mer.

ECS Systèmes de Combat Electroniques (*Electronic Combat Systems*), BL de THALES DMS qui propose des systèmes aéroportés de radars et des systèmes de guerre électronique en particulier pour le Rafale, des programmes de modernisation et le support client associés

Entity Appellation des objets dans la bibliothèque ANSA, cela concerne les points, faces, propriétés, ...

Fluent Logiciel d'ANSYS permettant la simulation d'un maillage dans un environnement paramétré

GBU Global Business Unit, correspond à un domaine d'activité stratégique réuni dans une même branche d'entreprise

GTS Systèmes de transport terrestre (*Ground Transportation Systems*), entité THALES qui fournit des solutions de signalisation ferroviaire, des systèmes intégrés de communication et de supervision, des solutions billettiques et les services associés.

GUI Interface graphique (*Graphical User Interface*)

Icepak Logiciel d'ANSYS permettant le pré-processing, le maillage et le post-processing dans le but de faire une simulation

ID Identifiant

IPC-2581 Format de fichier d'un PCB équipé de ses composants à un format standard

ISR Intelligence, Surveillance, Reconnaissance (*Intelligence, Surveillance and Reconnaissance*), BL de THALES DMS qui fournit des capteurs intelligents (guerre électronique et radars de surveillance) jusqu'aux systèmes intégrés de mission collaborative pour plateformes numériques et véhicules avec ou sans pilote

IT&S Technologies de l'Information et des Services

Jonction Dans un CTM, noeud enregistrant la plus grande hausse de température. Souvent proche des résistances ou au centre du composant

LAS Systèmes terrestres et aériens (*Land and Air Systems*), entité THALES qui fournit des systèmes, des équipements, des capteurs et des services pour le contrôle du trafic aérien civil et militaire, la défense aérienne et le combat terrestre.

META Logiciel de BETA permettant le post-processing d'une simulation

Metal Fraction Maillage de surface dont chaque élément représente le pourcentage de métal présent dans leur zone

PCB Circuit imprimé en électronique (*Printed Circuit Board*)

PCBA Circuit imprimé équipé de ces composants (*Printed Circuit Board Assembly*), dans la vie courante on parle aussi de carte électronique

PID Identifiant d'une propriété dans ANSA

POC Preuve de concept (*Proof Of Concept*)

R&D Recherche et Développement

repère topo Identification locale et unique d'un composant sur un PCBA. Cela comprend les initiales du groupe auquel il appartient et un nombre pour le différencier des autres

SIX Systèmes d'information et de communication sécurisés (*Secure Communications and Information Systems*), entité THALES qui fournit toute une gamme de solutions à ses clients de la défense et de la sécurité (communications sécurisées, réseaux résilients, ...)

TAS Espace (*Thales Alenia Space*), entité THALES qui fournit des satellites, des charges utiles, des équipements, des systèmes et des services pour différents programmes spatiaux

Thomson-Brandt Filiale française, créée en 1893, pour exploiter en France les brevets de la société américaine Thomson-Houston Electric Corp., co-fondateur du groupe Thomson-CSF qui deviendra le groupe THALES

Tj Température obtenue au niveau du noeud de Jonction qui est le point enregistrant la plus grande hausse de température dans le composant

TOP Couche qui surplombe les autres sur un assemblage. Si la carte est montée à l'horizontale, elle se retrouvera au-dessus

UWS Systèmes Sous-Marins (*Under Water Systems*), BL de THALES DMS qui dispose d'une large gamme de produits et systèmes pour les sous-marins, bâtiments de surface, navires de lutte contre les mines, drones et avions

via Trou métalisé permettant d'établir une connexion électrique entre les deux couches conductrices (interne ou externe) d'un PCB. Il peut être traversant, borgne ou enterré

XML Langage de balisage extensible (*Extensible Markup Language*) comme son nom l'indique langage informatique basé sur l'utilisation de balise qui marque le début et la fin d'information (proche de l'HTML)