

Prédiction tridimensionnelle de la température en régime permanent de sources de chaleur volumiques enterrées dans une carte électronique multicouche

Brice ROGIE^{1,2*}, Eric MONIER-VINARD¹, Nhat-Minh NGUYEN², Najib LARAQI², Valentin BISSUEL¹, Olivier DANIEL¹

¹Thales Corporate Engineering, 19-21 Avenue Morane Saulnier, 78140 Vélizy-Villacoublay, France

²Université Paris Ouest, Laboratoire Thermique Interfaces Environnement (LTIE), 50 rue de Sèvres, 92410 Ville d'Avray, France

brice.rogie@thalesgroup.com, eric.monier-vinard@thalesgroup.com, nhat-minh.nguyen@external.thalesgroup.com, nlaraqi@u-paris10.fr, valentin.bissuel@thalesgroup.com, olivier.daniel@thalesgroup.com

Résumé : Enterrer des puces actives au sein de cartes électroniques (ou PWB pour Printed Wired Circuit) permet d'augmenter la densité des circuits intégrés mais cela conduit à exercer des contraintes thermiques supplémentaires à l'intérieur de la structure. Afin d'aider les concepteurs à évaluer l'impact thermique de leur design, plusieurs approches analytiques ont été analysées.

L'étude présentée se concentre sur un modèle thermique basé sur un substrat de trois couches anisotropes. Les puces enterrées sont représentées soit surfaciques ou volumiques. Ces approximations sont ensuite comparées à un modèle numérique détaillé qui prend en compte toutes les couches du PWB.

Comme pressenti la précision dépend de la représentation géométrique de la source. Le modèle surfacique génère une erreur relative de $\pm 16\%$ avec le modèle numérique et se réduit à $\pm 8\%$ avec le modèle volumique.

Néanmoins les deux modèles démontrent une bonne capacité à prédire le comportement thermique de puces enterrées et l'impact de leur placement.

Finalement, la représentation volumique de la puce est discutée en termes de temps de calcul.

Mots clés : Puces enterrées, source volumique, thermique de l'électronique, modélisation mathématique, simulations CFD

1. Introduction

L'innovation des technologies de circuits imprimés est principalement due à l'augmentation du nombre de composants présents sur un PWB ainsi que la miniaturisation des composants électroniques. L'incrustation de puces actives ou de composants passifs permet d'économiser de la place pour les PWB à haute densité de composants.

Ce nouveau concept consiste à enterrer des puces minces, ou des micros composants passifs dans les couches internes du PWB afin de les insérer entre les couches restantes de carte comme présenté Fig.1.

Finalement il est possible d'intégrer des composants montés aux surfaces externes du PWB pour accroître sa densité.

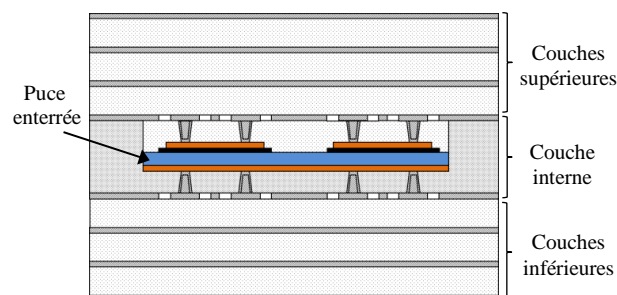


Fig.1 Section en coupe d'un schéma de PWB avec puce enterrée

L'adoption de cette technologie innovante tend à accroître la concentration de chaleur au cœur du substrat. Il faut donc optimiser le placement des composants au sein des couches internes pour s'assurer du bon fonctionnement de l'ensemble.

Dans le but d'aider les concepteurs électroniques à explorer les limites de la dissipation de puissance de composants enterrés, une étude analytique a été réalisée. Cette étude permet de connaître rapidement le champ de température de l'ensemble du domaine (cartes & composants).

Plusieurs approches analytiques ont été étudiées au cours du temps à propos de la thermique des cartes électroniques multicouches. La solution la plus rapide est basée sur un réseau de résistances thermiques [1] ou chaque couche est représentée par sa valeur de résistance thermique.

Des études analytiques de l'équation de la chaleur basées sur les séries de Fourier [2] [3] ou les fonctions de [4] ont été développées mais en considérant des sources de chaleur surfaciques et placées à la jonction de deux couches consécutives. Le modèle proposé est basé sur la résolution par les séries de Fourier. Les sources de chaleur sont localisées dans le volume de la couche et sont considérées volumiques. Finalement une solution hybride avec des sources surfaciques inter-couches et des sources volumiques peut être utilisée par le principe de superposition.

2. Modèle analytique pour mono-puce enterrée

Cette section se porte sur la modélisation analytique en régime permanent d'une puce encastrée au sein d'une carte électronique multicouche refroidie par convection et rayonnement.

2.1. PWB de trois couches avec les bords adiabatiques

La problématique portant sur la simulation de semi-conducteurs comme source de chaleur volumique a été adressée dans des précédents travaux [3]. Cette étude antérieure se concentre sur une représentation monocouche du PWB, ce qui est une hypothèse grossière de modélisation.

L'étude suivante étend la modélisation de sources volumiques encastrées dans une représentation plus détaillée des différentes couches d'une carte électronique, dans le but d'améliorer sa précision.

Dans ce but, le substrat est décomposé en trois couches équivalentes. La puce se situe dans la couche centrale alors que les couches supérieures et inférieures sont soumises à un coefficient de transfert thermiques respectivement nommé \bar{h} et \underline{h} sur leur surfaces en contact avec le fluide, voir Fig.2.

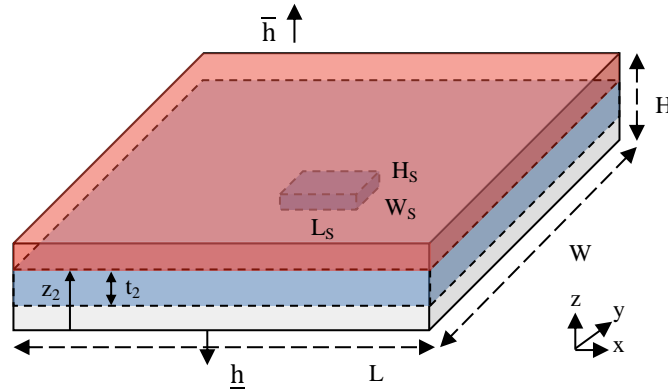


Fig.2 Source de chaleur 3D dans un PWB de trois couches

Les quatre bords de chaque couche sont considérés adiabatiques du fait de leur très faible épaisseur [3] [5]. Chaque couche de ce PWB équivalent, avec pour indice « i », est considérée anisotrope ayant trois conductivités thermiques distinctes, définies par kx_i , ky_i et kz_i .

L'équation de diffusion de la chaleur en régime permanent pour toutes les couches s'exprime alors:

$$kx_i \cdot \frac{\partial^2 \theta_i(x, y, z)}{\partial x^2} + ky_i \cdot \frac{\partial^2 \theta_i(x, y, z)}{\partial y^2} + kz_i \cdot \frac{\partial^2 \theta_i(x, y, z)}{\partial z^2} + \lambda \cdot \dot{q} = 0 \quad (1)$$

Avec l'excès de température sous la forme:

$$\theta_i(x, y, z) = T_i(x, y, z) - T_\infty \quad (2)$$

Le paramètre λ est égal à 1 quand la source est présente ou égale à 0 dans les autres cas. La densité de puissance volumique de la puce est définie par l'expression suivante:

$$\dot{q} = \frac{q}{L_S \cdot W_S \cdot H_S} \quad (3)$$

Les dimensions de la source parallélépipédique sont L_S , W_S et H_S sur les axes x , y ou z . La localisation de la source est définie par les coordonnées de son centre x_C , y_C et z_C .

Les conditions limites du modèle développé sont regroupées ci-dessous:

$$kz_1 \cdot \left. \frac{\partial \theta_1(x, y, z)}{\partial z} \right|_{z=0} = \underline{h} \cdot \theta_1(x, y, z) \quad (4)$$

$$kz_3 \cdot \left. \frac{\partial \theta_3(x, y, z)}{\partial z} \right|_{z=H} = -\bar{h} \cdot \theta_3(x, y, z) \quad (5)$$

Les dimensions du substrat parallélépipédique sont L , W et H en fonction des axes x , y et z . Les conditions limites pour les bords adiabatiques sont:

$$kx_i \cdot \left. \frac{\partial \theta_i(x, y, z)}{\partial x} \right|_{x=0 \text{ or } L} = 0 \quad (6)$$

$$ky_i \cdot \left. \frac{\partial \theta_i(x, y, z)}{\partial y} \right|_{y=0 \text{ or } W} = 0 \quad (7)$$

Il est supposé qu'il n'y ait pas de résistance thermique d'interface entre couches [5], ce qui entraîne une conservation des températures et des flux entre deux couches.

$$\theta_i(x, y, z)|_{z=z_i} = \theta_{i+1}(x, y, z)|_{z=z_i} \text{ avec } i = 1, 2 \quad (8)$$

$$kz_i \cdot \left. \frac{\partial \theta_i(x, y, z)}{\partial z} \right|_{z=z_i} = kz_{i+1} \cdot \left. \frac{\partial \theta_{i+1}(x, y, z)}{\partial z} \right|_{z=z_i} \quad (9)$$

La distribution de la température dans un domaine multicouche avec source volumique interne a été résolue en utilisant les séries de Fourier. Le profil de température s'exprime de la manière suivante:

$$\theta_i(x, y, z) = q \cdot \sum_{m=0}^M \sum_{n=0}^N \sum_{p=0}^P A_{mnp_i} \cdot \cos\left(\frac{m\pi}{L} \cdot x\right) \cdot \cos\left(\frac{n\pi}{W} \cdot y\right) \cdot Z_{mnp_i}(z) \quad (10)$$

Le coefficient de Fourier A_{mnp_i} dépend de la couche. Par exemple, son expression pour la couche interne ($i=2$) ou la source est localisée est :

$$A_{mnp_2} = \frac{(Nx_m/Dx_m) \cdot (Ny_n/Dy_n) \cdot (Nz_{mnp}/Dz_{mnp})}{kx_2 \cdot \left(\frac{m\pi}{L}\right)^2 + ky_2 \cdot \left(\frac{n\pi}{W}\right)^2 + kz_2 \cdot \left(\frac{p}{H}\right)^2} \quad (11)$$

Le coefficient est défini à partir de la méthode des fonctions orthogonales. Les intégrations par axes sont calculées en considérant les dimensions de la source au numérateur et les dimensions de la carte pour le dénominateur. En ce qui concerne les couches externes, l'équation (8) permet de calculer le coefficient de Fourier.

$$A_{mnp_1} = \frac{A_{mnp_2} \cdot e^{r_{mn_1} \cdot (H-z_1)}}{\left[\psi_{mn_1} + e^{-2 \cdot r_{mn_1} \cdot t_1}\right]} \quad (12)$$

$$\text{Avec } \psi_{mn_1} = \frac{\gamma_{mn_1} + \underline{Bi}}{\gamma_{mn_1} - \underline{Bi}} \quad (13)$$

$$A_{mnp_3} = Z_{mnp_2}(z_2) \cdot \frac{A_{mnp_2} \cdot e^{r_{mn_3} \cdot (3H-z_2)}}{\left[\psi_{mn_3} + e^{2 \cdot r_{mn_3} \cdot t_3}\right]} \quad (14)$$

$$\text{Avec } \psi_{mn3} = \frac{\gamma_{mn3} - \overline{\text{Bi}}}{\gamma_{mn3} + \overline{\text{Bi}}} \quad (15)$$

Chaque paramètre de A_{mnp_i} est détaillé dans l'annexe. Le profil de température en z dépend aussi de la couche :

- $0 \leq z \leq z_1$ ($\forall p$)

$$Z_{mn1}(z) = e^{r_{mn1} \cdot (z-H)} \cdot [\psi_{mn1} + e^{-2 \cdot r_{mn1} \cdot z}] \quad (16)$$

- $z_1 \leq z \leq z_2$

$$Z_{mnp2}(z) = \cos\left[\frac{\vartheta_{mnp}}{H} \cdot (z - z_1)\right] + \underline{\chi}_{mn} \cdot \frac{z - z_1}{H} \cdot \text{sinc}\left[\frac{\vartheta_{mnp}}{H} \cdot (z - z_1)\right] \quad (17)$$

- $z_2 \leq z \leq z_3$ ($\forall p$)

$$Z_{mn3}(z) = e^{r_{mn3} \cdot (z-3 \cdot H)} \cdot [\psi_{mn3} + e^{2 \cdot r_{mn3} \cdot (H-z)}] \quad (18)$$

Les termes $\overline{\text{Bi}}$, $\underline{\text{Bi}}$ correspondent au nombre de Biot.

$$\overline{\text{Bi}} = \frac{\bar{h} \cdot H}{kz_3} \quad \& \quad \underline{\text{Bi}} = \frac{h \cdot H}{kz_1} \quad (19)$$

Le coefficient γ_{mni} pour les deux couches externes s'exprime sous la forme:

$$\gamma_{mni} = H \cdot r_{mni} \quad (20)$$

$$r_{mni} = \sqrt{\frac{kx_i}{kz_i} \cdot \left(\frac{m\pi}{L}\right)^2 + \frac{ky_i}{kz_i} \cdot \left(\frac{n\pi}{W}\right)^2} \quad (21)$$

Cependant, le coefficient ϑ_{mnp} est trouvé numériquement en résolvant l'équation transcendante suivante :

$$\vartheta_{mnp} = \zeta_{mnp} \cdot \frac{H}{t_2} \quad (22)$$

$$\tan(\zeta_{mnp}) = \frac{\zeta_{mnp} \cdot (\overline{\chi}_{mn} + \underline{\chi}_{mn})}{\zeta_{mnp}^2 - \overline{\chi}_{mn} \cdot \underline{\chi}_{mn}} \quad (23)$$

Tous les détails de l'équation sont développés en annexe.

2.2. Propriétés thermiques fictives

Le PWB est composé d'une succession de niveaux ou des couches de cuivre fortement thermiquement conductrices s'alternent avec des couches de résine faiblement conductrices. Cela entraîne une forte anisotropie de l'ensemble avec une conductivité importante dans le plan au contraire d'une faible conductivité transverse.

Dans le modèle analytique, les 21 couches du PWB sont remplacées par trois couches équivalentes. La couche interne où se situe la source de chaleur reste inchangée, alors que les couches supérieures et inférieures sont réunies.

Les coordonnées en z des différentes couches sont résumées dans le tableau suivant:

Table 1. Epaisseur des couches du PWB équivalent

Couche	z_{\min} (mm)	z_{\max} (mm)	hauteur (mm)
Inférieure '1'	0	0.43	0.43
Interne '2'	0.43	0.7	0.27
Supérieure '3'	0.7	1.13	0.43

La conductivité thermique effective dans le plan (kx_i and ky_i) ainsi que transverse (kz_i) sont calculées suivant la formule suivante [3] [5] [8] :

$$kx_i \text{ or } ky_i = \frac{1}{t_i} \cdot \sum_{j=1}^{nl} [(k_C - k_D) \cdot cc_j + k_D] \cdot t_j \quad (24)$$

$$kz_i = t_i \cdot \sum_{j=1}^{nl} \frac{[(k_C - k_D) \cdot cc_j + k_D]}{t_j} \quad (25)$$

Les paramètres appelés k_C et k_D sont respectivement la conductivité thermique du cuivre et du diélectrique (résine). Leur valeur sont respectivement fixées à $380 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ et $0.8 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$.

Les pistes des signaux électriques de même que les vias traversant le diélectrique sont définis par un pourcentage de cuivre, appelé cc . Les conductivités thermiques pour chacune des couches sont listées dans le tableau suivant :

Table 2. Conductivité thermique équivalente

Conductivité thermique ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$)	kx_i	ky_i	kz_i
Inférieure '1'	46	46	1.17
Interne '2'	1.16	1.16	1.16
Supérieure '3'	46	46	1.17

L'émissivité de la surface de la carte est fixée à $\varepsilon = 0.95$.

2.3. Ressources mathématiques

Le logiciel Mathcad® a été utilisé pour effectuer les calculs analytiques. Les différents résultats dans les tableaux sont définis par l'acronyme MA, pour Modèle Analytique. La limite des séries de Fourier tronquées de l'équation (10) sont déduites par l'expression suivante :

$$M = \omega \cdot \frac{L}{L_S}, N = \omega \cdot \frac{W}{W_S} \text{ et } P = \omega \cdot \frac{t_2}{H_S} \quad (26)$$

Il faut remarquer que le ratio dans l'équation (26) est le rapport entre l'épaisseur de la couche ou se situe la source et la hauteur de la source, et non l'épaisseur totale de la carte.

Afin d'avoir une bonne convergence des résultats, la valeur d' ω est fixée à 15. Cependant cette valeur peut être réduite pour minimiser le nombre d'itération du coefficient de Fourier comme présenté Fig.3.

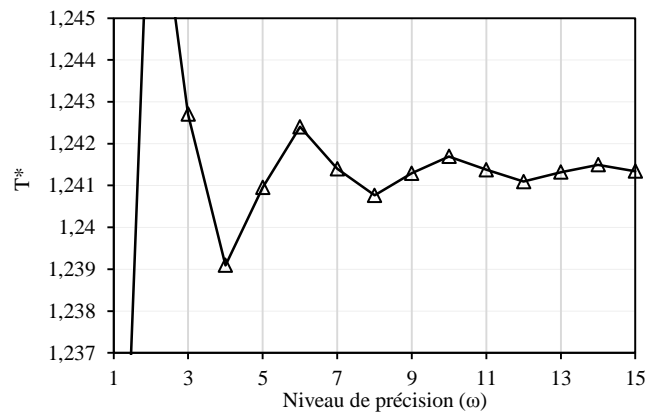


Fig.3 Température adimensionnelle en fonction du niveau de précision ω

Des valeurs impaires plus faibles, tel que $\omega = 9$ or 11 , permettent de garder un bon niveau de précision.

2.4. Modélisation numérique

Les validations numériques ont été réalisées avec un logiciel de CFD (Computational Fluid Dynamics) appelé Icepak®. La version 17.2 a été utilisée. Ce logiciel commercial permet de réaliser des modèles détaillés réalistes ainsi que de modéliser les conditions d'environnement de test comme la convection naturelle conjuguée à la radiation.

Toutes les couches du PWB sont modélisées dans la simulation, ainsi que la puce comme un bloc de silicium. Concernant la puce, seulement sa surface supérieure dissipe de la chaleur, les composants actifs étant généralement concentrés dans cette zone (transistors).

Les simulations ont été exécutées sur le système suivant: 2 Intel Xeon E5-2680, avec une fréquence de 2.7GHz, possédant 32 cœurs en tout et 256GB RAM.

Les résultats sont désignés par l'acronyme MN pour Modèle Numérique. Le maillage du modèle, après étude de sa sensibilité sur les résultats, est de 7 millions d'éléments.

3. Proofs of concept

3.1. Approches analytiques du problème

Deux approches analytiques ont été confrontées à un modèle numérique réaliste du PWB. Les deux concepts sont présentés dans la Fig.4.

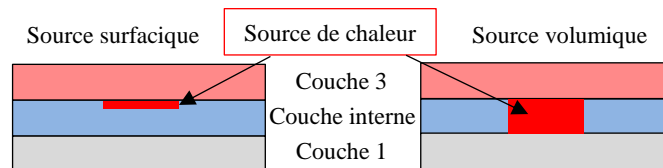


Fig.4 Hypothèses des modèles analytiques

La chaleur dissipée par la puce en silicium à l'intérieur de la couche interne est donc assimilée à une:

- Source de chaleur surfacique
- Source de chaleur volumique

En effet, en considérant la faible dimension de la puce comparée aux dimensions de la carte, la conduction thermique au sein du semi-conducteur est négligée.

La définition d'un modèle analytique dédié à une source de chaleur surfacique encastrée a été développée dans [2] [5] [9].

Les résultats des deux modèles sont nommés par MA_V et MA_P respectivement pour Volumique et Surfactive. La comparaison des modèles analytiques par rapport au modèle numérique s'effectue sur la température de la puce, le point clé de cette étude. C'est donc la température moyenne \bar{T} et la température centrale T_C de sa surface supérieure qui ont été évaluées.

3.2. Validation sur modèle réel

Un véhicule de test thermique a été construit pour caractériser le comportement thermique d'un set de puces enterrées au sein d'un PWB [9]. Le véhicule est basé sur un format standard Européen pour les PWB. Par définition, la longueur (suivant l'axe x) est de 100 mm (L) et une largeur (suivant l'axe y) de 160 mm.

La section de la carte est constituée d'un empilement symétrique de 8 couches conventionnelles qui coïncident 5 couches internes où se situent les puces actives. La composition complète de la carte est détaillée dans l'annexe. L'épaisseur totale (H) des 21 couches de la structure est de 1.13 mm.

Trois puces rectangulaires sont encastrées dans la couche interne. La position de leur centre de gravité est :

- Puce N°1 ou C1: $x_C = 50\text{mm}$, $y_C = 80\text{mm}$, $z_C = H/2$
- Puce N°2 ou C2: $x_C = 50\text{mm}$, $y_C = 110\text{mm}$, $z_C = H/2$
- Puce N°3 ou C3: $x_C = 58\text{mm}$, $y_C = 110\text{mm}$, $z_C = H/2$

La longueur, largeur et hauteur d'une puce est respectivement de $L_S = 7\text{mm}$, $W_S = 7\text{mm}$ et $H_S = 270\mu\text{m}$.

4. Pertinence du modèle analytique

Deux cas tests sont reportés dans le but de démontrer la pertinence des deux modèles analytiques sur la prédiction des températures.

4.1. Cas test 1: Mono-puce

Le premier cas considère seulement une seule puce active (puce C1) dissipant de la chaleur.

Sa dissipation est fixée à 1.5W, cela se traduit par respectivement une dissipation de 0.03W.mm⁻² pour le modèle surfacique et 0.11W.mm⁻³ pour le modèle volumique.

La différence de température entre les différentes méthodes de calcul est basée sur la formule suivante :

$$\Delta T = \frac{T_{AM} - T_{NM}}{T_{NM} - T_{\infty}} \quad (27)$$

T_{MA} est la température extraite du modèle analytique et T_{MN} celle du modèle numérique. La différence est exprimée en pourcent.

La Table 3 fait la synthèse des résultats des deux approches analytiques avec ceux du modèle numérique pour une température ambiante de 85°C.

Table 3. Comportement thermique du PWB avec C1 activée

Orientation de la carte		Horizontale	Verticale
Puce (q=1.5W)		C1	C1
MN (°C)	\bar{T}	103.4	103.0
	T _C	104.0	103.6
MA _P (°C)	\bar{T}	105.0	104.6
	T _C	107.1	106.6
ΔT_P (%)	$\frac{\Delta T}{\bar{T}}$	8.6	8.5
	$\frac{\Delta T_C}{\bar{T}}$	16.0	16.1
MA _V (°C)	\bar{T}	104.3	103.8
	T _C	105.5	105.1
ΔT_V (%)	$\frac{\Delta T}{\bar{T}}$	4.6	4.4
	$\frac{\Delta T_C}{\bar{T}}$	8.0	7.9

Les deux approches analytiques donnent des prédictions pessimistes de la température. Néanmoins la différence de température est acceptable pour une investigation rapide de l'impact d'une puce enterrée sur le comportement thermique d'une carte électronique. Pour les deux modèles l'erreur maximum est inférieure à 20%.

Une partie de cette surestimation est dû à l'approximation, dans le MA, d'un coefficient de transfert thermique constant appliqué uniformément sur les surfaces externes de la carte. En réalité les échanges thermiques dépendent de l'écoulement du fluide aux alentours des parois de la carte. De plus la température des parois interagit avec la température de Bulk [12]. La Fig.5 surligne le caractère non linéaire du transfert de chaleur convective quand la carte est placée verticalement.

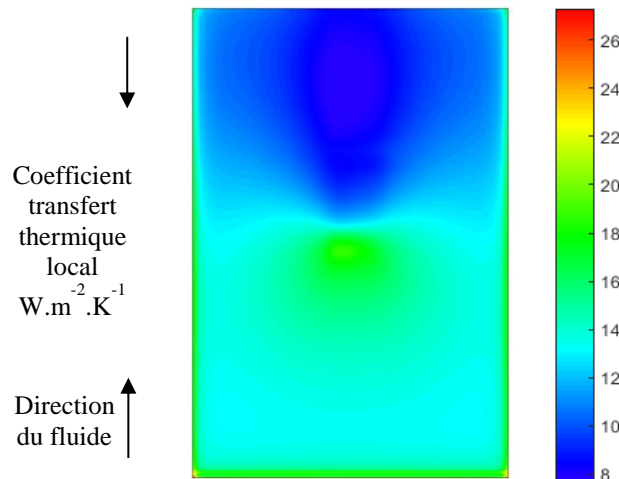


Fig.5 Coefficient de transfert thermique local sur la face supérieure du PWB

Le coefficient de transfert thermique moyen issu des différentes simulations est résumé dans la Table 4.

Table 4. Coefficient de transfert thermique moyen du PWB

Orientation		Horizontale		Verticale	
Modèle		MA	MN	MA	MN
Conv./	Top	2.1/10.1	2.3/10.1	3.3/10.0	2.6/10.1
Rad.	Bot	2.1/10.1	2.2/10.1	3.3/10.0	2.6/10.1

Concernant les approches analytiques, les valeurs de h ont été estimées utilisant une expression empirique issue de l'équation (32) de [9].

De plus, le transfert radiatif apparait comme être le mode de transfert prédominant (75 à 82 %) avec un coefficient de transfert thermique proche de $10W.m^{-2}.K^{-1}$, qu'importe l'orientation [13].

4.2. Hypothèses du modèle analytique

Plusieurs hypothèses ont été utilisées dans le MA dans le but de d'obtenir un modèle simple et rapide. Ces hypothèses sont expliquées ainsi que leur impact sur la précision.

- Conditions limites simplifiées du MN

Comme mentionné précédemment, le coefficient de transfert thermique n'est pas constant tout au long de la surface de la carte, contrairement au modèle analytique.

Cependant, dans l'hypothèse d'un coefficient de transfert thermique constant imposé aux parois du MN, la simulation devient un problème purement conductif dépendant exclusivement de la structure de la carte.

Après convergence, les résultats issus du MN révisé sont similaires à ceux du modèle initial ($\pm 0.1^\circ C$) du cas test 1 (Table 3). Un coefficient de transfert thermique constant apparait suffisant pour avoir obtenu des résultats précis.

Cela s'explique par une valeur moyenne du coefficient de transfert thermique proche (Table 4) pour chaque modèle. Ainsi la variation du coefficient sur les surfaces externes influe peu sur les prédictions de température.

- MN avec trois couches équivalentes

Une autre hypothèse utilisée dans le MA est le regroupement des 21 couches du PWB en 3 couches équivalentes : couche supérieure, interne et inférieure.

C'est pourquoi le MN a été de nouveau modifié pour avoir une condition similaire que celle du MA, c'est-à-dire 3 couches équivalentes avec une conductivité anisotrope.

Les prédictions thermiques du MN modifié sont à nouveau similaires à celles du modèle initiale du cas test 1.

On en déduit qu'un modèle composé de deux couches externes équivalentes et d'une couche interne apparait suffisant pour correctement évaluer le comportement thermique d'un PWB composé de 21 couches.

- Non prise en compte du matériau des puces

La dernière hypothèse utilisée pour le MA est la non considération du matériau de la puce. Le matériau de la couche est utilisé pour remplacer celui de la puce. En effet, la puce est seulement représentée par sa dissipation thermique.

Dans le but de vérifier l'influence du matériau de la puce sur les prédictions générées par le MN de 21 couches, le silicium est remplacé par le matériau de la couche.

Comme prévu, les prédictions thermiques du MA surfacique sont très proches de celles du MN, vu Table 5. La non prise en compte du silicium très conducteur entraîne une surestimation de la température dû à une concentration de la chaleur sur la surface supérieure de la puce.

Table 5. Comportement thermique du PWB pour source non-silicium

Orientation de la carte		Horizontale	Verticale
Puce ($q=1.5W$)		C1	C1
MN ($^\circ C$)	\bar{T}	105.2	104.8
	T_C	107.2	106.7
MA _P ($^\circ C$)	\bar{T}	105.0	104.6
	T_C	107.1	106.6
ΔT_P (%)	$\bar{\Delta T}$	-1.0	-1.0
	ΔT_C	-0.5	-0.5

- Validation du MA volumique

Finalement le MN a été de nouveau modifié pour correspondre au MA volumique, c'est à dire 3 couches équivalentes et une dissipation volumique de la source. Les conditions limites sont identiques au MA (h constant).

La dissipation de chaleur est appliquée au volume entier de la puce and son matériau n'est pas prise en compte comme précédemment.

Table 6. Comportement thermique du PWB modifié

Orientation de la carte		Horizontale	Verticale
Puce ($q=1.5W$)		C1	C1
MN ($^{\circ}C$)	\bar{T}	104.3	103.9
	T_C	105.6	105.1
MA _V ($^{\circ}C$)	\bar{T}	104.3	103.8
	T_C	105.5	105.1
ΔT_V (%)	$\overline{\Delta T}$	< 0.1	< 0.1
	ΔT_C	0.1	0.1

La comparaison des deux modèles montre une très faible erreur (< 0.1%) sur les températures. De plus le temps de calcul est similaire, en considérant seulement le temps de résolution, moins de 2 minutes pour chaque modèle.

Cela démontre la validité du modèle mathématique quand les conditions limites sont similaires.

Pour conclure, la source d'erreur principale des deux approches analytiques comparées au MN est la non considération du matériau de la puce. Le silicium, dû à une conductivité thermique importante, tend à diminuer la concentration thermique au sein de la puce, et donc sa température.

Dans le cas du PWB avec puce enterrée, l'approche analytique avec source volumique permet de quantifier rapidement les contraintes thermiques de cette nouvelle technologie.

4.3. Cas test 2: Multi-puce

Les deux autres puces enterrées dans le véhicule de test, C2 et C3, sont activées en plus de C1. Ces nouvelles puces sont aussi localisées dans la couche interne. Basé sur le principe de superposition, le profil de température est réécrit dans le but de prendre en compte plusieurs sources de chaleur (voir annexe).

Les dissipations appliquées aux puces présentes dans le PWB sont de 1.5W pour C2 et 2W pour les deux autres puces. La température ambiante est gardée à 85°C.

La Table 7 détaille les prédictions de température (moyenne et centrale) pour chaque puce enterrée à l'intérieur du PWB. Le MN est le même modèle que celui du cas test 1.

Table 7. Comportement thermique du PWB soumis à 3 sources de chaleur volumiques ou surfaciques

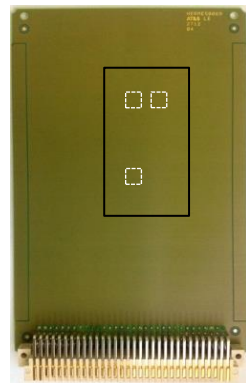
Orientation		Horizontale			Verticale		
Puce		C1	C2	C3	C1	C2	C3
MN ($^{\circ}C$)	\bar{T}	119.0	123.9	126.1	116.9	122.6	124.6
	T_C	119.8	124.5	126.8	117.7	123.1	125.4
MA _S ($^{\circ}C$)	\bar{T}	121.5	126.6	129.3	119.8	124.8	127.5
	T_C	124.1	128.6	132.0	122.5	126.8	130.1
ΔT_S (%)	$\overline{\Delta T}$	7.1	6.8	7.8	9.1	6.0	7.3
	ΔT_C	12.5	10.3	12.2	14.8	9.6	11.6
MA _V ($^{\circ}C$)	\bar{T}	120.4	125.8	128.2	118.8	124.0	126.4
	T_C	122.1	127.0	129.8	120.5	125.1	128.0
ΔT_V (%)	$\overline{\Delta T}$	4.1	4.6	5.2	5.9	3.7	4.6
	ΔT_C	6.5	6.2	7.2	8.5	5.4	6.4

Comme précédemment évoqué, les deux MA donnent une surestimation des températures de puces.

Comme pour le cas test 1 (mono-puce), le MA volumique donne des résultats plus proche du MN. L'erreur est environ divisée par 2 par rapport au modèle surfacique.

De plus, l'expression du profil de la température permet de représenter les contraintes thermiques n'importe où dans le PWB ainsi que l'influence de la localisation des puces.

Par exemple, la Fig.7 représente la différence, en termes de champs de température, des trois modèles utilisés : le modèle numérique et les deux modèles analytiques (surfacique et volumique). Le domaine est représenté Fig.6.



Coordonnées XY du rectangle noir:

$$40 \text{ mm} < x < 68 \text{ mm}$$

$$70 \text{ mm} < y < 120 \text{ mm}$$

En blanc les localisations des trois puces

Fig.6 Vue du dessus de la carte de test HERMES avec la localisation des puces

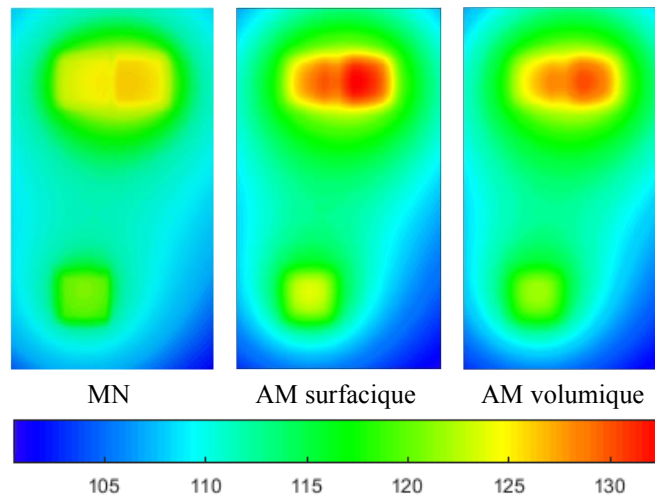


Fig.7 Champs de température de la carte à $z = 0.7 \text{ mm}$ (surface top de la puce) avec $100.5 \text{ °C} \leq T \leq 132.6 \text{ °C}$

Du fait d'une puissance dissipée supérieure dans la carte, les coefficients de transfert thermique augmentent légèrement.

Table 8. Coefficient de transfert thermique moyen du PWB

Orientation		Horizontale		Verticale	
Modèle		MA	MN	MA	MN
Conv./	Top	2.8/10.5	2.7/10.6	4.4/10.4	4.3/10.5
Rad.	Bot	2.8/10.5	2.6/10.6	4.4/10.4	4.3/10.5

5. Investigation du modèle analytique

Le choix d'un modèle mathématique comme outil de design préliminaire est justifiés pour plusieurs points comme :

- La précision accrue d'un modèle analytique
- Un faible temps de calcul
- Facilité d'utilisation de l'outil

Tous ces aspects sont débattus dans les sections suivantes.

5.1. Précision

Le modèle analytique volumique possède une meilleure précision par rapport au modèle surfacique.

Cela vient de la capacité du silicium à diffuser la chaleur au sein de la puce au contraire du matériau de la couche peu conducteur. Le silicium permet de diminuer le gradient thermique et de diffuser la chaleur dans tout le volume même si la partie active de la puce se situe sur sa face supérieure.

Appliquer une source volumique de chaleur à la place d'une source surfacique permet de recréer le phénomène décrit précédemment en diminuant la concentration de chaleur dans la puce et donc sa température.

Cependant, les deux MA sont pessimistes en terme température, ce qui est accommodant avec les besoins des designers électronique en phase de pré-design.

5.2. Temps de calcul

Le grand avantage d'un modèle analytique est son temps de calcul réduit. En effet, pour être justifié, le modèle doit être au minimum plus rapide qu'un modèle numérique détaillé.

De plus, il n'y a pas de phase de calibration du modèle analytique. Le nombre de termes dans les séries de Fourier est déterminé automatiquement pour toujours donner une solution convergée, qu'importe les conditions limites ou la géométrie. D'autre part, un modèle numérique est sensible au maillage de la géométrie, qui impacte grandement les résultats et le temps de calcul.

Néanmoins, la considération d'une source volumique introduit de la complexité dans le problème mathématique. Malgré des résultats plus proches d'un MN par rapport à un MA surfacique, son temps de calcul est grandement impacté par cette nouvelle formulation mathématique.

C'est pourquoi la pertinence d'un modèle volumique par rapport à un modèle surfacique est débattue Fig.8.

Cette figure met en avant, pour le cas test 1, le temps de calcul (en bleu) pour les deux approches analytiques, ainsi que la différence de température par rapport au MN (en noir) en fonction du niveau de précision ω .

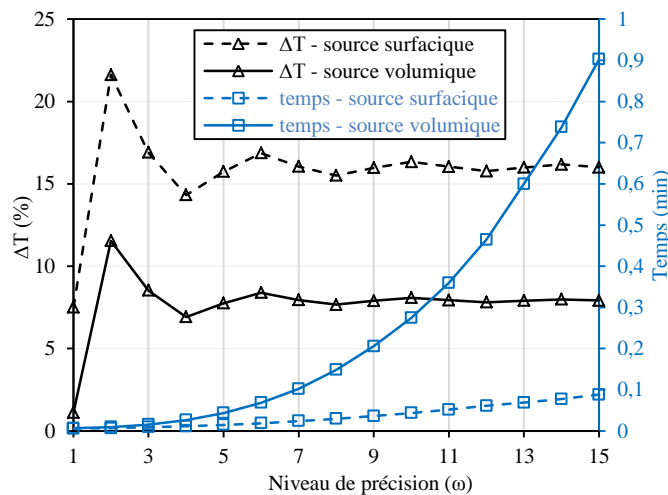


Fig.8 Différence en température et temps de calcul en fonction du niveau de précision ω

Comme attendu, le MA volumique est 10 fois plus lent que le MA surfacique pour $\omega = 15$ dû à un modèle plus complexe.

Malgré cela, pour un outil de pré-design, un temps de calcul inférieur à 1 minute est suffisamment rapide pour effectuer des études paramétriques.

Finalement le gain en précision d'environ 50% sur les prédictions de température valide le choix d'un modèle plus complexe.

La Fig.8 représente aussi l'influence du paramètre ω sur les résultats des modèles. Son niveau peut être réduit tout en gardant une faible divergence pour accélérer la résolution.

Le modèle est dit convergé pour une valeur d' $\omega \geq 15$ pour une variation de température $< 0.01\%$. Une plus faible valeur d' ω est également acceptable. La table suivante synthétise les prédictions de température pour $\omega = 7$ et 15.

Table 9. Temps de calcul et précision en fonction du niveau de précision ω

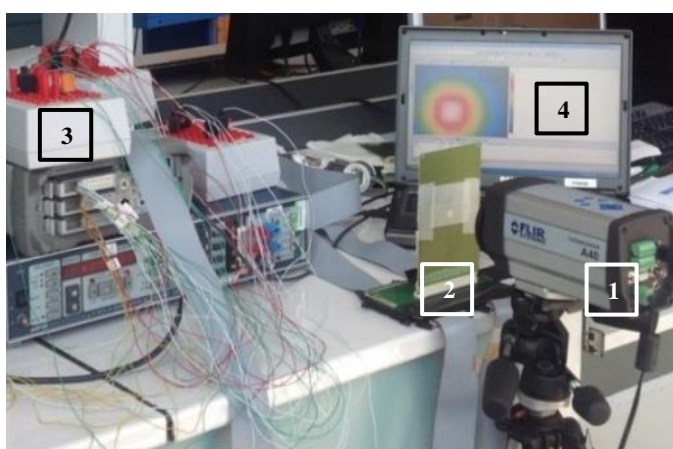
ω	Source volumique		Source surfacique	
	temps (s)	ΔT (%)	temps (s)	ΔT (%)
7	6.1	7.9	1.4	16.1
15	54.2	7.8	5.3	16.0

Cette comparaison témoigne que pour une précision similaire le temps de calcul peut être divisé par un facteur 7.

6. Validation expérimentale

Afin de valider le modèle analytique, les prédictions ont été confrontées à des résultats expérimentaux.

Le véhicule de test a été placé verticalement et seule la puce C1 a été soumise à un courant électrique. Les conditions de laboratoire sont représentées dans la Fig.9. En ce qui concerne le mode de transfert radiatif, la température ambiante de la pièce est supposée la même que celle des murs, définie par T_{∞} .



1. Caméra Infrarouge FLIR
2. Véhicule de test HERMES
3. Source de puissance et câblage
4. Vision de la caméra infrarouge (champs de température + températures localisées)

Fig.9 Protocole expérimental – PWB en position verticale avec caméra infrarouge

La Table 10 représente les résultats pour deux configurations: une puissance dissipée dans la puce de 1.75W (0.13W.mm³) pour une température ambiante de 22.2°C et une puissance de 1.92W (0.15W.mm³) pour une température ambiante de 26°C.

La température de la projection de la puce sur la surface supérieure de la carte a été enregistrée avec la caméra infrarouge. La précision de la caméra FLIR est de +/- 2°C. La température maximum (T_S) et la température moyenne de la surface (\overline{T}_S) sont présentées dans la table suivante.

Table 10. Données expérimentales en comparaison avec les prédictions du MA volumique

$T_{\infty}=22.2^{\circ}C$ & $P=1.75W$	Exp ($^{\circ}C$)	MA _V ($^{\circ}C$)	ΔT (%)
T_S	45.4	44.4	-4.4
\overline{T}_S	44.8	42.9	-8.6
$T_{\infty}=26^{\circ}C$ & $P=1.92W$	Exp ($^{\circ}C$)	MA _V ($^{\circ}C$)	ΔT (%)
T_S	48.5	50.2	7.5
\overline{T}_S	47.3	48.5	5.7

Les prédictions de températures du MA volumique ont une divergence inférieure à 10% (relatif) par rapport aux données issues de l'expérimentale. Cette erreur est tout à fait acceptable en phase de pré-design.

Cependant, les résultats issus du MA sont optimistes dans le premier cas et pessimistes pour le second. Cette variation peut s'expliquer par l'amplitude de la caméra IR et les artefacts expérimentaux. La répétition de ces essais pour diminuer ces incertitudes doit être menée. En conclusion, la méthode mathématique proposée est validée expérimentalement en tant qu'outil de pré-design.

Conclusion

Une approche analytique a été mise à jour afin d'adresser la problématique des contraintes thermiques d'une source volumique enterrée dans une carte électronique multicouche. A partir d'un modèle équivalent monocouche, un modèle trois-couches a été modélisé dans le but de prendre en compte les discontinuités de la conductivité thermique entre couches.

La méthode proposée a été validée pour une carte soumise à la convection libre couplée à la radiation. La divergence en matière de prédiction des températures de puce du modèle analytique sont inférieures à 8% comparé à un modèle numérique détaillé.

Il apparait que la simplification d'un PWB composé de 21 couches en modèle équivalent trois couches, une ou se situe les puces et deux couches externes, est valide qu'importe le nombre de source de chaleur et leur localisation.

De plus, les résultats issus du modèle analytique ont été comparés avec des essais expérimentaux, révélant une erreur relative inférieure à 9% sur les températures de surface, ce qui valide définitivement le modèle développé.

Pour résumé, le modèle analytique volumique présenté permet une prédiction rapide et précise des températures maximums (température de jonction) de puces enterrées au sein d'une carte électronique multicouche, ainsi que de composants passifs tels que des résistances ou des inductances. Cela permet ainsi d'évaluer l'impact thermique du placement d'un composant et de réaliser rapidement des études d'optimisation.

Références

- [1] A. Jain, R. E. Jones, R. Chatterjee, S. Pozder, Analytical and Numerical Modeling of the Thermal Performance of Three-Dimensional Integrated Circuits, IEEE Transactions On Components And Packaging Technologies, Vol. 33, No. 1, March 2010
- [2] L. Choobineh, A. Jain, An explicit analytical model for rapid computation of temperature field in a three-dimensional integrated circuit (3D IC), International Journal of Thermal Sciences, Vol. 87, 103-109, 2015
- [3] E. Monier-Vinard, B. Rogie, N.M. Nguyen, N. Laraqi, V. Bissuel, O. Daniel, Practical steady-state temperature prediction of active embedded chips into high density electronic board, EURO THERM 7th, 2016, Krakow, Poland.
- [4] F. L. T. Maggioni, H. Oprins, E. Beyne, I. De Wolf, M. Baelmans, Fast convolution based thermal model for 3D-ICs: Methodology, accuracy analysis and package impact, Microelectronics Journal, Vol. 45, 1746-1752, 2014.
- [5] E. Monier-Vinard, N. Laraqi, C. T. Dia, M. N. Nguyen, V. Bissuel, Analytical modeling of multi-layered Printed Circuit Board dedicated to electronic component thermal characterization, Solid State Electronic Journal, 2015, Vol. 103, 30-39.
- [6] Muzychka Y.S, Yovanovitch M.M., Culham J.R, Influence of geometry and edge cooling on thermal Spreading resistance, Journal of thermo-physics and heat transfer, Vol 20, No2, June 2006
- [7] Brucker A. K., Majdalani J, Effective thermal conductivity of common geometric shapes, International Journal of heat and mass transfer 48, 4779-4796, 2005
- [8] M-N Nguyen, E. Monier-Vinard, N. Laraqi, C-T. Dia, V. Bissuel, Calculation Limits of Homogeneous Effective Thermal Conductivity Approach in Modeling of PCB, Proceeding of the 20th Thermnic Conference, 2014, 10.1109/THERMINIC.2014.6972484
- [9] E. Monier-Vinard, C. Dia, V. Bissuel, O. Daniel, Thermal modeling of active embedded chip into high density electronic board, EUROSIME XIV, 2012, Lisbon, Portugal, 10.1109/ESimE.2012.6191720.
- [10] E. Monier-Vinard, N. Laraqi, C. Dia, V. Bissuel, N. Nguyen, Analytical thermal modeling of multilayered active embedded chips into high density electronic board, Thermal Science, 2013, 10.2298/TSCI120826072M
- [11] Culham J.R., Yovanovich M.M. and Lemczyk, Thermal Characterization of Electronic Packages Using a Three-Dimensional Fourier Series Solution, ASME Journal of Electronic Packaging, Vol. 122, No. 3, 2000, pp. 233-239.
- [12] Bazylak A., Djilali N., Sinton D., Natural convection in an enclosure with distributed heat sources, Numerical heat transfer, Part A 49, 655-667, 2006.
- [13] Lewandowski W.M., Kubski P., Methodical Investigation of Free Convection from Vertical and Horizontal Plates, Warme-und Stoffubertragung 17, 147-154, 1983.

Annexes

Coefficients relatifs à l'équation (11)

$$\frac{Nx_m}{Dx_m} = \frac{2}{1 + \delta_m} \cdot \frac{1}{L} \cdot \cos\left(\frac{m\pi}{L} \cdot x_c\right) \cdot \text{sinc}\left(\frac{m\pi}{L} \cdot \frac{L_S}{2}\right) \quad (\text{A.1})$$

$$\frac{Ny_n}{Dy_n} = \frac{2}{1 + \delta_n} \cdot \frac{1}{W} \cdot \cos\left(\frac{n\pi}{W} \cdot y_c\right) \cdot \text{sinc}\left(\frac{n\pi}{W} \cdot \frac{W_S}{2}\right) \quad (\text{A.2})$$

Coefficients relatifs à l'équation (11) (bis)

$$\frac{Nz_{mnp}}{Dz_{mnp}} = \frac{\text{sinc}\left(\frac{\vartheta_{mnp}}{2} \cdot \frac{H_S}{H}\right) \cdot Z_{mnp_2}(z_c)}{t_2 \cdot \left[1 + \text{sinc}(2 \cdot \zeta_{mnp}) + \left(\frac{\chi_{m,n}}{\vartheta_{mnp}}\right)^2 \cdot [1 - \text{sinc}(2 \cdot \zeta_{mnp})] + 2 \cdot \chi_{m,n} \cdot \frac{t_2}{H} \cdot \text{sinc}^2(\zeta_{mnp})\right]} \quad (\text{A.3})$$

Coefficients relatifs à l'équation (22)

$$\underline{\chi}_{mn} = \gamma_{mn_1} \cdot \frac{kz_1}{kz_2} \cdot \frac{[\psi_{mn_1} - e^{-2 \cdot r_{mn_1} \cdot t_1}]}{[\psi_{mn_1} + e^{-2 \cdot r_{mn_1} \cdot t_1}]} \quad (\text{A.4})$$

$$\bar{\chi}_{mn} = \gamma_{mn_3} \cdot \frac{kz_3}{kz_2} \cdot \frac{[-\psi_{mn_3} + e^{2 \cdot r_{mn_3} \cdot t_3}]}{[\psi_{mn_3} + e^{2 \cdot r_{mn_3} \cdot t_3}]} \quad (\text{A.5})$$

Température moyenne d'une puce (s)

$$\bar{\theta}(s) = q(s) \cdot \sum_{m=0}^M \sum_{n=0}^N \sum_{p=0}^P A_{mnp_i}(s) \cdot \cos\left(m\pi \cdot \frac{x_c(s)}{L}\right) \cdot \cos\left(n\pi \cdot \frac{y_c(s)}{W}\right) \cdot \text{sinc}\left(\frac{m\pi}{2} \cdot \frac{L_S(s)}{L}\right) \cdot \text{sinc}\left(\frac{n\pi}{2} \cdot \frac{W_S(s)}{W}\right) \cdot \text{sinc}\left(\frac{\vartheta_{mnp}}{2} \cdot \frac{H_S(s)}{H}\right) \cdot Z_{mnp_{ij}}(z_c(s)) \quad (\text{A.6})$$

Profile de température dans le cas de multiples sources de chaleur

$$\theta_i(x, y, z) = \sum_{j=1}^{nS} q_j \cdot \sum_{m=0}^M \sum_{n=0}^N \sum_{p=0}^P A_{mnp_{ij}} \cdot \cos\left(\frac{m\pi}{L} \cdot x_j\right) \cdot \cos\left(\frac{n\pi}{W} \cdot y_j\right) \cdot Z_{mnp_{ij}}(z_j) \quad (\text{A.7})$$

Définition des 21 couches du PWB

	Couche	Nom	ti	cci %
10 couches supérieures du PWB	1	TOP	25µm	0.05
	2	DIEL1	60µm	0.001
	3	INT2	25µm	0.95
	4	DIEL2	60µm	> 0.001
	5	INT3	25µm	0.05
	6	DIEL3	60µm	> 0.001
	7	INT4	25µm	0.05
	8	DIEL4	60µm	> 0.001
	9	INT5	25µm	0.95
	10	DIEL5	65µm	> 0.001
Couche interne	11	CHIP-DIEL	270µm	0.003
10 couches inférieures du PWB	12	DIEL6	65µm	> 0.001
	13	INT6	25µm	0.95
	14	DIEL7	60µm	> 0.001
	15	INT7	25µm	0.05
	16	DIEL8	60µm	> 0.001
	17	INT8	25µm	0.05
	18	DIEL9	60µm	> 0.001
	19	INT9	25µm	0.95
	20	DIEL10	60µm	0.001
	21	BOT	25µm	0.05