

Modélisation Thermique des composants électroniques en régime transitoire

Cheikh Tidiane DIA^{1,2*}, Eric MONIER – VINARD², Valentin BISSUEL², Olivier DANIEL², Najib LARAQI¹

¹ Université Paris Ouest, Laboratoire Thermique Interfaces Environnement, EA 4415, GTE, 50 Rue de Sèvres, F-92410 Ville d'Avray

² Thales Corporate Services
18 Rue du Maréchal Juin, 92 360 Meudon La Forêt

* auteur correspondant : cheikh-tidiane.dia@thalesgroup.com

Résumé- L'étude présentée dans cet article porte sur une méthodologie de génération de modèles dynamiques compacts destinés aux composants électroniques. Cette approche s'inspire du projet européen DELPHI [1] qui est à l'origine d'une standardisation concernant la génération de modèle comportemental, appelé Compact Thermal Model [2]. Cette standardisation est maintenant reprise par le comité de standardisation JEDEC, une organisation américaine dédiée aux semi-conducteurs. Toutefois, la méthodologie proposée par le consortium DELPHI est limitée au régime permanent, ainsi qu'aux composants mono-puces, ce qui réduit son champ d'application.

Nomenclature

A	Ambiante	P _D	Puissance dissipée par la puce, W
C	Capacité thermique, J. K ⁻¹	Q	Flux thermique, W
C _p	Capacité thermique spécifique, J.kg ⁻¹ .K ⁻¹	R	Résistance thermique, K.W ⁻¹
CTM	Modèle thermique compact	RC	Réseau à plusieurs résistances–capacitances
DCTM	Modèle thermique compact dynamique	S	Surface, m ²
h	Coefficient d'échange, W.m ⁻² .K ⁻¹	t	Temps, s
H	Epaisseur du composant, m	T	Température, °C
I	Inner	T _A	Température ambiante, °C
J	Jonction	V	Volume, m ³
k	Conductivité thermique, W.m ⁻¹ .K ⁻¹	W	Largeur du composant, m
L	Longueur du composant, m	We	Poids du nœud de la jonction
NN	Nombre de nœuds	ρ	Masse volumique, kg.m ⁻³
NR	Réseau à plusieurs résistances	1R	Réseau à 1 résistance
NS	Nombre de scénarios	2R	Réseau à 2 résistances
NT	Nombre de pas de temps		

1. Introduction

Une voie pour limiter les températures vues par les composants électroniques sans avoir recours à des systèmes de refroidissement sophistiqués, passifs (caloduc par exemple) ou actifs (ventilateur par exemple), consiste à optimiser leur durée d'activation et de désactivation.

Le concept des modèles réduits désignés sous le nom de Compact Thermal Model ou «CTM» a permis ces dernières années de minimiser la taille des modèles numériques et de réduire les temps de calcul tout en conservant une précision importante. Cette démarche a été explicitée, en 1996, par une méthodologie de caractérisation thermique des composants électroniques, proposée par le consortium Européen DELPHI.

Ainsi, un composant est réduit sous la forme simplifiée d'un réseau thermique. En fait, il

s'agit de définir un ensemble de résistances thermiques prépondérantes, reliant son élément le plus sensible, dit puce, ou une zone active de celle-ci, à ses différentes faces externes. Le but est de reproduire, avec une très bonne précision, le comportement thermique d'un modèle numérique détaillé.

Toutefois, la conception actuelle des modèles «CTMs» ne permet pas de déterminer l'évolution temporelle de cette température. Notre objectif est par conséquent de créer une nouvelle gamme de modèles thermiques réduits, désignée par le nom de Dynamic Compact Thermal Model ou par l'acronyme «DCTM» qui soit capable de reproduire, le plus fidèlement possible, le comportement thermique, en régime transitoire, d'un composant électronique.

2. Processus de réduction

A l'instar des «CTMs», les «DCTMs», sont générés à partir des réponses temporelles d'un modèle numérique détaillé soumis à un ensemble de sollicitations différentes. Celles-ci sont matérialisées par un jeu de coefficients d'échange thermique appliqué sur chacune des faces externes du modèle du composant.

L'ensemble de ces données est ensuite traité au moyen d'un algorithme génétique afin de définir les résistances, de conserver les plus déterminantes, puis de déterminer les capacités nécessaires, pour reproduire avec précision, le comportement thermique du composant.

3. Ajustement via les algorithmes génétiques

Notre méthode de résolution s'est portée sur l'utilisation des algorithmes génétiques [3]. Celle-ci s'inspire de la théorie de l'évolution de Charles Darwin. La population de départ, pour la détermination du CTM, est composée d'un ensemble de matrices pleines contenant les différentes résistances reliant les nœuds du réseau.

Il est nécessaire d'ajuster des paramètres d'évolution, tels que le nombre de générations, les taux de croisements et de mutations, pour adapter de manière progressive une population aléatoire donnée vers une solution optimale compatible de critères requis.

En pratique, à l'issue du processus d'évolution, on retient le réseau thermique ayant le meilleur score pour un ensemble de conditions d'environnement. Celui-ci est qualifié par une fonction, dite coût, dont une forme est explicitée par l'équation (1). Le réseau final est obtenu en éliminant les résistances qui ont un impact mineur sur la fonction coût.

Celle-ci tient compte de la température maximale de la jonction (T_j), des températures moyennes (T_i) des autres nœuds du réseau ainsi que de leur flux thermique (Q_i).

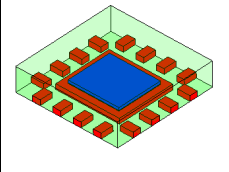
Un poids plus important, $We=0.8$, est accordé aux températures afin d'avoir plus de précision sur la température de jonction. Celle-ci matérialise la partie la plus sensible du composant.

Pour avoir une bonne précision entre le modèle DCTM et modèle détaillé, la fonction coût doit être proche de 1.

$$\text{Cost}_f = 1 - We \cdot \left[\begin{array}{l} 0.5 \cdot \frac{\sum_{n=1}^{NS} \sum_{i=1}^{NN} (T_{i,n}^{CTM} - T_{i,n}^{DTM}) / (T_{i,n}^{DTM} - T_A)}{NS \cdot NN} \\ + 0.3 \cdot \text{Max} \cdot \left[\frac{(T_{i,n}^{CTM} - T_{i,n}^{DTM}) / (T_{i,n}^{DTM} - T_A)}{\dots} \right] \\ + 0.2 \cdot \text{Max} \cdot \left[\frac{(T_{j_{k,n}}^{CTM} - T_{j_{k,n}}^{DTM}) / (T_{j_{k,n}}^{DTM} - T_A)}{\dots} \right] \end{array} \right] + (We - 1) \cdot \left[\begin{array}{l} 0.5 \cdot \frac{\sum_{n=1}^{NS} \sum_{i=1}^{NN} (Q_{i,n}^{CTM} - Q_{i,n}^{DTM}) / P_D}{NS \cdot NN} \\ + 0.5 \cdot \text{max} \left(\frac{(Q_{i,n}^{CTM} - Q_{i,n}^{DTM}) / P_D}{\dots} \right) \end{array} \right] \quad (1)$$

4. Résultat de la réduction d'un composant réel en régime permanent

Le composant commercial étudié est un boîtier Quad Flatpack No leads (QFN16). Celui-ci est doté de 16 plots d'interconnexion électrique, au pas de 0.65mm. Sa puce en Silicium est collée sur une plateforme métallique et est protégée par de la résine. Ses principales caractéristiques sont décrites dans la Fig. 1.



	L (mm)	W (mm)	H (mm)	V (mm ³)	ρ (kg.m ⁻³)	Cp (J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)	k (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	Cx (J.K ⁻¹)
Puce	1,9	1,9	0,3	1,19	2330	708	k _{Si}	0,00197
Plateforme	2,4	2,4	0,2	1,15	8900	385	260	0,00395
Colle	1,9	1,9	0,03	0,108	1900	920	2,1	0,00019
16 x Plots	0,23	0,4	0,2	0,147	8900	385	260	0,0005
Résine	4	4	0,85	11	1900	920	0,66	0,0192

$$k_{Si} = 148 \cdot \left(\frac{T + 273}{300} \right)^{-1/3}$$

Fig. 1: Caractéristiques utilisées par le modèle numérique détaillé du QFN 16

La puissance de la puce est appliquée à une fine couche surfacique de 50µm d'épaisseur située sur la partie supérieure de la puce, sa dissipation est fixée à 1W.

La colle est située à l'interface puce-plateforme. Et les plots servent à la connexion électrique. Notre méthode de réduction fait appel à plusieurs jeux de coefficients d'échange thermique, en fait 49 scénarios définis par la méthodologie DELPHI. Ceux-ci sont représentatifs de conditions aux limites rencontrées par un composant sur une carte électronique, ceci pour différents modes de refroidissement actif et passif.

D'autre part, la méthodologie propose également une technique de décomposition des surfaces.

A une surface du modèle détaillé est attribué un nœud du modèle réduit.

Les réseaux de type DELPHI, possédant N résistances, sont beaucoup plus précis [4], ils retraduisent une cartographie thermique plus «physique» des faces supérieure et inférieure du composant contrairement aux réseaux simplifiés (1R, 2R) ne possédant qu'un seul nœud par face. D'autre part, les modèles de type DELPHI restent pertinent et précis quelles que soient les conditions aléatoires appliquées [5] (puissance différente...).

En fait, la multiplicité des scénarios imposés soumet les éléments constitutifs du composant, telle que la puce, à une large gamme de température traduisant les différentes conditions d'environnement auxquelles peut être soumis le composant.

5. Application sur un composant réel en régime transitoire

Compte tenu de la complexité des réseaux DELPHI, l'analyse sur la modélisation du comportement transitoire du composant QFN16 a été conduite sur la topologie suivante.

Seules ses faces supérieure et inférieure respectivement désignées par «Top» et «Bottom» sont soumises à un jeu de coefficients d'échange thermique uniformes. Ses autres faces sont considérées adiabatiques.

Cette première analyse démontre qu'il est obligatoire de décomposer les chemins thermiques

en une série d'échelons RC, ceci de manière à retranscrire plus fidèlement l'évolution temporelle des températures des nœuds du modèle; «Junction», «Top» et «Bottom».

A titre d'exemple, le comportement thermique du composant QFN16 peut être décrit sous la forme du réseau présenté dans le Tableau 1. Celui-ci est composé de cinq résistances et de cinq capacités thermiques. Pour améliorer la qualité du modèle, les résistances thermiques «Junction-Top» et «Junction-Bottom» ont été scindées en deux. Les valeurs distinctives de ces résistances ainsi que celles des capacités thermiques sont déduites d'un processus complémentaire, lequel ajuste 2 paramètres, f et g, destinés à mieux reproduire les paliers de la montée en température du composant.

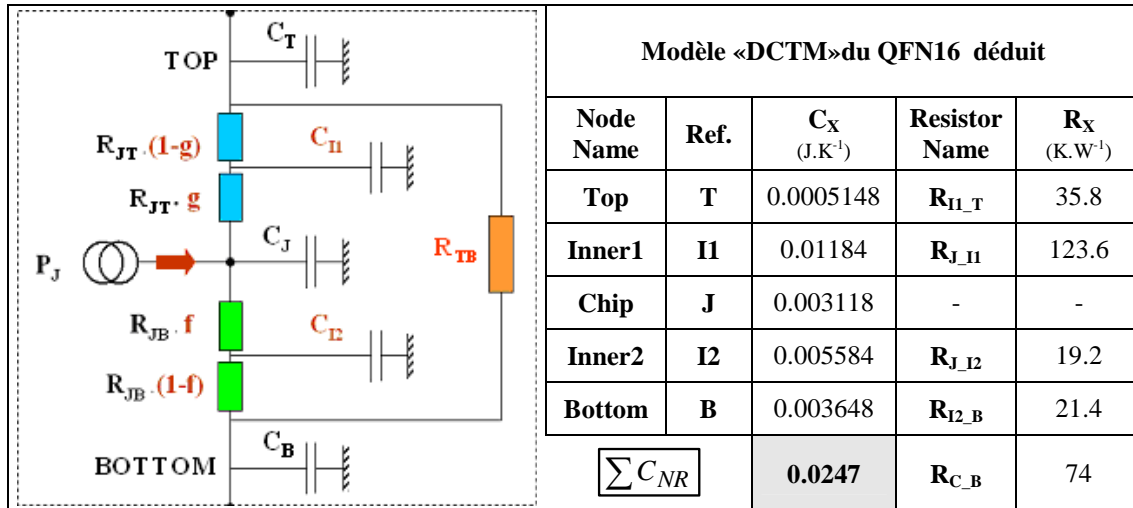


Tableau 1: Topologie du réseau «DCTM» du QFN16

Les dix scénarios complémentaires dits «transitoires», repris de le Tableau 2, ont été appliqués afin d'ajuster le comportement dynamique du réseau thermique RC à celui du modèle détaillé.

Scenarios	h «Case» (W.m ⁻² .K ⁻¹)	h «Board». (W.m ⁻² .K ⁻¹)	Durée de stabilisation
1	15	100	70s
2	50	250	27s
3	800	20	10s
4	10 ⁻⁸	10 ⁻⁸	TJ-MAX
5	40	1000	8s
6	10 ⁻⁸	100	81s
7	1000	40	8s
8	100	10 ⁻⁸	81s
9	15	200	38s
10	30	200	35s

Tableau 1: Scénarios «transitoires» appliqués au QFN16

L'évaluation de la capacité thermique globale du «DCTM» est proche de celle du modèle numérique détaillé, à savoir 0.0258 J.K^{-1} , l'écart constaté est inférieur à 5%.

D'autre part, la prise en compte du régime transitoire a nécessité de définir une nouvelle fonction coût. Celle-ci est donnée par l'équation (2).

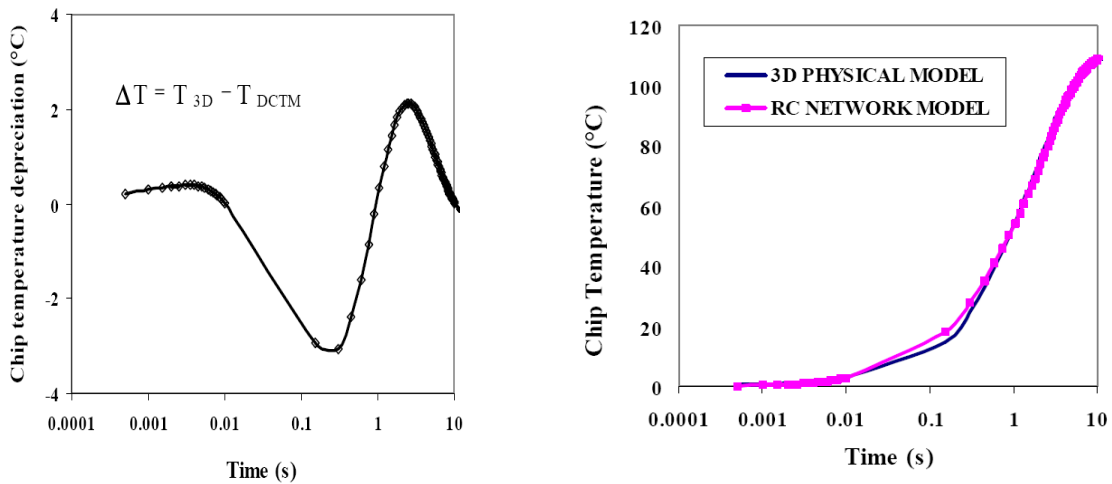
Le poids accordé au nœud correspondant à la jonction, est désormais fixé à $We=0.6$.

$$S = 1 - \frac{\sum_{k=1}^{NS} \sum_{i=1}^{NN} \sum_{j=1}^{NT} \left[We \cdot \left[\frac{T_{J,k}^{DTM}(t_j) - T_{J,k}^{DCTM}(t_j)}{T_{J,k}^{DTM}(t_j) - T_A} \right]^2 + \frac{(1-We)}{NN-1} \cdot \left[\frac{T_{i \neq J,k}^{DTM}(t_j) - T_{i \neq J,k}^{DCTM}(t_j)}{T_{i \neq J,k}^{DTM}(t_j) - T_A} \right]^2 \right]}{NS \cdot NN \cdot NT} \quad (2)$$

Pour juger de la pertinence du modèle déduit, le modèle «DCTM» et le modèle détaillé du QFN16 ont été comparés à partir d'un scénario aléatoire.

Ainsi, deux coefficients aléatoires d'échange thermique uniformes ont été appliqués sur les faces externes «Top» et «Bottom» du modèle, respectivement de 20 et $800 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$. Ce cas de figure se rapproche de la configuration d'un composant posé sur une carte électronique. En effet, une grande partie du flux est drainée par la face «Bottom» du composant en contact avec carte.

La comparaison des prédictions de ces 2 modèles pour l'intégralité de la durée d'activation est indiquée sur la Figure 2.



Ecart de température des 2 modèles

Réponse temporelle de la température de la puce

Fig. 2: Comparaison des températures de jonction des deux modèles du QFN16

Les profils de la Figure 2 démontrent que la topologie de réseau proposée est en mesure de modéliser le comportement thermique de la puce du composant QFN16. Ceci reste également valable pour les deux autres nœuds caractéristiques du modèle, à savoir les nœuds «Top» et «Bottom». L'écart en température des prédictions n'excède pas 4°C .

Par ailleurs, nos travaux ont révélé que l'augmentation de la subdivision des résistances sur les chemins thermiques, reliant la puce à ces faces, augmente la précision du modèle DCTM en particulier sur les premiers pas de temps. Entre 0 et 0,01 s, l'écart maximal n'est plus que de $0,25^\circ\text{C}$ (en valeur absolue), au lieu de $0,4^\circ\text{C}$ pour le modèle de la figure 2.

6. Conclusions

Une première investigation sur la capacité à réaliser un modèle thermique dynamique d'un composant électronique a permis de générer le modèle comportemental dit «DCTM», à partir d'une topologie de réseau utilisant un jeu de 5 résistances et 5 capacités thermiques. Ce modèle comportemental est capable de prédire, avec précision, l'évolution des températures de l'élément le plus sensible d'un composant électronique, en régime transitoire sur un ensemble de cas tests aléatoires.

Cette analyse démontre que l'emploi d'un processus de réduction basé sur l'utilisation des algorithmes génétiques s'avère adéquat pour la réalisation de modèle thermique dynamique. Le processus actuel fait appel à 2 étapes successives de réduction.

La première utilise l'approche classique de type DELPHI pour créer le réseau de résistances, puis une seconde étape, à partir d'un jeu de scénarios temporels supplémentaires, consiste à déterminer les capacités à associer à ce réseau.

La suite de ces travaux portera sur la génération de modèles ayant des topologies de réseau plus sophistiquées, prenant en compte une décomposition des surfaces externes du modèle afin d'obtenir une meilleure précision quelle que soit la complexité géométrique du composant à modéliser.

Références :

- [1] SHIDORE S., SAHRAPOUR A., DELPHI Compact Models Revolutionize Thermal Design, Flomerics.
- [2] SABRY M.N., Compact Thermal Models for electronic Systems, IEEE Transactions on components and packaging technologies, Vol.26, N°1 (2003) pp. 179-185.
- [3] PARTHIBAN A., KANKANHALLY N.S., ISHAK A.A., Determination of Thermal Compact Model via Evolutionary Genetic Optimization Method, IEEE Transactions on components and packaging technologies, vol. 28, no 2, (2005) pp. 345-352.
- [4] LASANCE Clemens J.M., Two Benchmarks for the study of Compact Thermal Modelling Phenomena, Phillips Research Laboratories, 6th Int. workshop on THERMINIC 2000, Budapest, 24-27 September 2000, ISBN 2-913329-51-9, (2000) pp. 235-243.
- [5] GERSTENMAIER Y.C., PAPE H., WACHUTCHA G., Boundary Independent Exact Thermal Model for Electronic Systems, Nanotech Vol.1, Proc. 4th conf. Modeling and Simulation of Microsystems (MSM), (2001) pp.84-87.