

# Modélisation Thermique Dynamique des « Powerpaks »

Cheikh Tidiane DIA<sup>1,2\*</sup>, Eric MONIER – VINARD<sup>2</sup>, Najib LARAQI<sup>1</sup>, Valentin BISSUEL<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup> Thales Corporate Services

18 Rue du Maréchal Juin, 92 360 Meudon La Forêt

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

**Résumé-** Dans cet article, nous nous intéressons, dans un premier temps, à l'impact thermique des fils de connexion ou « bondings » sur la température maximale ou température de jonction d'une puce électronique. Ensuite, nous discuterons de la génération de modèles compacts dynamiques dans le but de réduire la complexité et les temps de calcul exorbitants auxquels sont confrontés la plupart des ingénieurs en thermique de l'électronique. L'approche utilisée pour la réduction des modèles s'inspire du projet européen DELPHI [1]. Néanmoins, cette méthode n'est applicable qu'en régime permanent avec des composants disposant d'une seule source de dissipation.

## Nomenclature

A	Ambiante	P <sub>D</sub>	Puissance dissipée par la puce, W
C	Capacité thermique, J. K <sup>-1</sup>	R	Résistance thermique, K.W <sup>-1</sup>
C <sub>p</sub>	Capacité thermique spécifique, J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>	RC	Réseau à plusieurs résistances-capacitances
MTD	Modèle thermique détaillé	S	Surface, m <sup>2</sup>
MTCD	Modèle thermique compact dynamique	t	Temps, s
h	Coefficient d'échange, W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup>	T	Température, °C
I	Nœud fictif interne	T <sub>A</sub>	Température ambiante, °C
J	Jonction	ρ	Masse volumique, kg.m <sup>-3</sup>
k	Conductivité thermique, W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>	G	Conductance thermique, W.K <sup>-1</sup>

## 1. Introduction

Les fils de connexions sont très souvent négligés dans la modélisation numérique des composants électroniques. Avec l'augmentation des entrées/sorties des composants, ceux-ci peuvent avoir un impact significatif au niveau thermique. Dans la première partie de l'article, nous étudierons la prise en compte des fils de connexion sur des composants, de la famille des « powerpaks », ayant des tailles similaires. Ils représentent des mosfets, c'est-à-dire des composants considérés comme mono-sources.

Par ailleurs les fonctions électroniques sont de plus en plus concentrées au sein d'un même composant. Cette nouvelle technologie a tendance à intensifier la densité de puissance, et donc à rendre les composants de plus en plus critiques. Une des solutions pour diminuer la température, sans solution de refroidissement, est de jouer sur les temps d'activation. Nous étudierons dans la deuxième partie de l'article la méthodologie de génération de modèles compacts dynamiques.

## 2. Etude des « powerpaks »

Les « powerpaks » peuvent être utilisés pour remplacer les composants tels que les Dpak et les SO classiques. Les avantages majeurs sont la réduction des contraintes mécaniques et l'augmentation des performances thermiques [2].

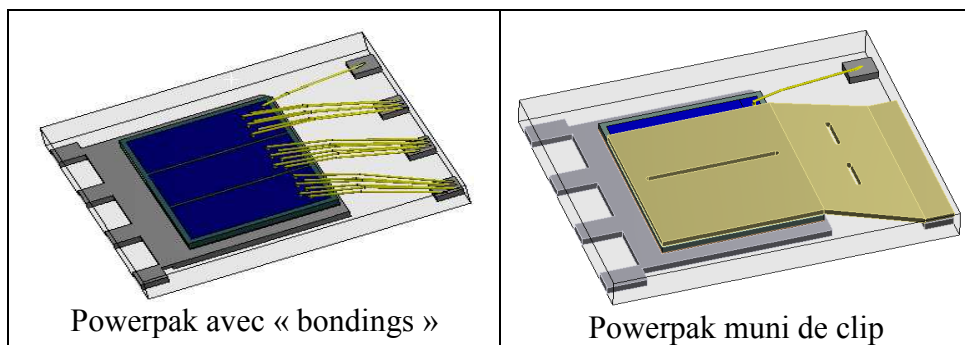
Constituants	Nom de référence	k	ρ	Cp
Resine	SUMITOMO-EME-6710SG	0.67	1900	920
Puce	Silicium	$k_{Si}$	2330	708
Palette	OLIN C194	260	8900	385
Die attach	ABLESTIK 71-1	2.1	2400	728
Bondings	Or	317	19300	128

**Tableau 1 : Caractéristiques thermiques des matériaux**

La puce est en silicium dont la conductivité thermique est dépendante de la température selon la formulation (1).

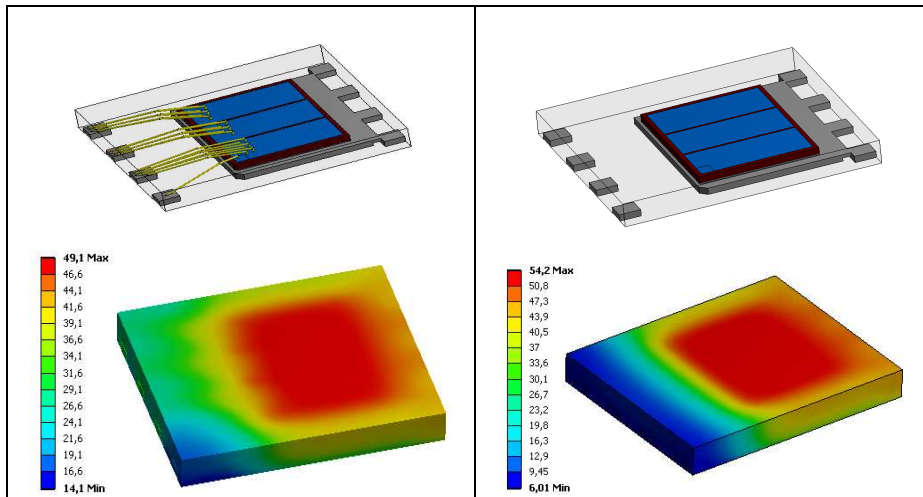
$$k_{Si} = 148 \cdot \left( \frac{T + 273}{300} \right)^{-1/3} \quad (1)$$

Dans cette partie, nous étudions deux « powerpaks ». Les composants ont des tailles identiques. L'un des composants est muni de « bondings » pour assurer la connexion vers la source du mosfet, alors que l'autre utilise un « clip » tel que décrit dans la Figure 1. La taille du composant est de 6 mm x 4.9 mm x 0.649 mm et le diamètre des bondings est de 50 μm. Les caractéristiques thermiques des différents éléments sont données dans le Tableau 1.



**Figure 1 : Deux types de « powerpaks »**

En or pour la plupart des composants électroniques, les « bondings » sont de plus en plus remplacés par du cuivre pour des problèmes de coûts de production entre autre. Néanmoins au niveau thermique si l'impact des « bondings » est assez significatif comme le montre la Figure 2, la nature des matériaux n'as pas d'influence importante. En effet, nous observons une diminution de 10.4 % sur la température de jonction de la puce. Nous avons utilisé un cas test aléatoire en imposant des coefficients d'échange uniformes sur les faces externes du composant comme mentionné en Annexe A, scénario 50. La température ambiante est considérée comme nulle et la puce dissipe une puissance de  $P_D = 0.9$  Watt.

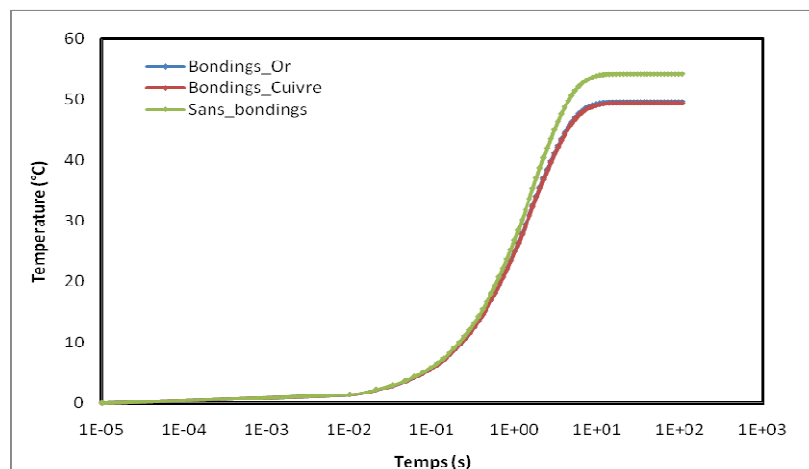


**Figure 2 : Impact des « bondings » sur la température de jonction**

La Figure 3 donne la montée en température sur trois cas : « bondings » en or, « bondings » en cuivre et sans « bondings ».

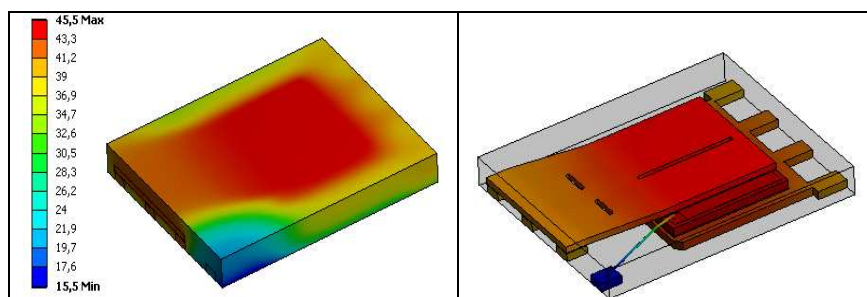
Les premiers paliers correspondent au chargement des matériaux tels que la puce et la palette. La divergence apparaît vers 0.1 s, c'est à dire au moment du chargement de la résine englobant les « bondings ».

La nature des matériaux des fils de connexions ne joue pas sur l'évolution de la température en fonction du temps. En fait, c'est la résine qui impose sa masse thermique au composant.



**Figure 3 : Influence des matériaux sur la montée en température**

Pour améliorer les performances thermiques, une partie des « bondings » est parfois remplacée par un clip. Celui-ci joue un rôle de dissipateur thermique. Sur le même cas test, décrit précédemment, nous observons une diminution de la température maximale de 3.6 °C.



**Figure 4 : Powerpak avec un clip**

Ainsi pour rester fidèle au vrai composant, il est nécessaire de représenter ces fils de connexion. Néanmoins la prise en compte de ces éléments rend plus complexe la géométrie. Le temps de simulation au niveau composant devient excessif. Ce qui n'est pas réaliste dans un contexte industriel. Il faut donc trouver une solution pour simplifier le modèle détaillé. Le concept de modèle compact thermique défini par le projet européen DELPHI est une approche pour résoudre cette problématique. La résolution est basée sur une approche nodale en considérant des nœuds internes de dissipation et des nœuds de surfaces considérés comme uniformes en température.

### 3. Modèles dynamiques existants

La plupart des publications proposent des modèles RC compacts dynamiques Cauer ou Foster. Ces modèles sont en générale issus de mesures expérimentales avec une température imposée sur la face inférieure de la carte de test et les autres surfaces étant isolées. De ce fait, le flux de chaleur peut être conçu comme étant unidirectionnel. Le modèle Foster est une succession en échelle de résistance et capacité en parallèle. Il est très souvent utilisé et peut être représenté en formulation exponentielle comme indiqué dans l'équation (1).

$$Z_{TH}(t) = \sum_{i=1}^n R_i \cdot \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t}{R_i \cdot C_i}\right) \right] \quad (1)$$

Néanmoins, le modèle de type Foster n'est qu'un modèle comportementale et ne représente pas la réalité physique. En effet, pour ce type de représentation, les capacités sont reliées aux nœuds adjacents alors que les capacités doivent être reliées à la masse, traduisant plus fidèlement un chargement évolutif des différentes parties d'un composant.

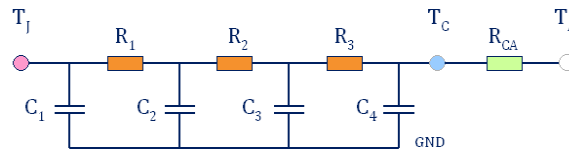


Figure 5 : Réseau thermique de type Cauer

### 4. Processus de réduction dynamique

La modélisation numérique d'un composant est basée sur l'étude technologique d'un composant réel. L'observation de la géométrie externe et interne du package, ainsi que de la constitution de ses différents matériaux permet de créer un modèle détaillé très proche du vrai composant. Une pré-étude sur le composant permet d'observer les gradients thermiques sur ses faces externes. Celles-ci permettent de définir des surfaces qui seront considérées comme isothermes dans les modèles compacts. La distribution de température du modèle numérique est confirmée par l'observation expérimentale comme en atteste la Figure 6.

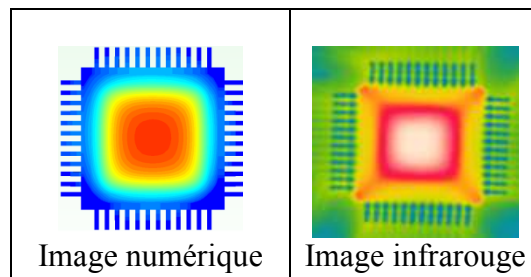


Figure 6 : Image numérique et infrarouge d'un composant électronique

Dans le cas d'un « powerpak » avec des « bondings », nous pouvons définir un nœud interne, appelé Jonction ou J, correspondant à la température maximale de la zone active et cinq nœuds de surface : Ti, Bi, To, Bo et S. Les nœuds sont reliés entre eux par des résistances thermiques et nous accrochons à chaque nœud une capacité thermique afin de définir un réseau RC. La Figure 7 montre l'exemple d'un réseau compact dynamique. Ces surfaces externes sont reliées au nœud représentant la température ambiante par des conductances de type « Newton ». Celles-ci seront notée G dans la suite de l'article.  $G_{Top\_A}$  représentera par exemple la conductance entre les nœuds « Top » et « ambiante ».

En utilisant une analogie électrothermique, la loi des nœuds est appliquée à chacun des points du réseau.

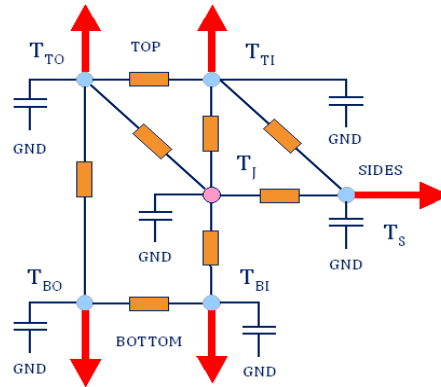


Figure 7 : Exemple de réseau thermique dynamique

Cette loi appliquée au nœud de « jonction » au temps  $t_k$ , par exemple, donne :

$$P_J(t_k) = C_J \cdot \frac{T_J(t_k) - T_J(t_{k-1})}{t_k - t_{k-1}} + G_{J\_T} [T_J(t_k) - T_T(t_k)] + G_{J\_B} [T_J(t_k) - T_B(t_k)] + G_{J\_S} [T_J(t_k) - T_S(t_k)] \quad (2)$$

Le même raisonnement est appliqué aux autres nœuds du réseau. La puissance appliquée à un nœud peut évidemment être nulle. Pour des composants mono-sources, seule la puissance de la « jonction » est non nulle.

Cette approche permet d'avoir une résolution matricielle du problème tel que définit dans l'équation (3).

$$[P] = [C] \frac{d[T]}{dt} + [G'] [T] \quad (3)$$

- Où [P] représente la matrice de puissances.  
[C] est la matrice de capacités thermiques.  
[T] représente la matrice de températures.  
et [G'] est une matrice contenant les conductances thermiques.

Le processus de réduction se fait en deux étapes. On détermine d'abord la matrice de résistances correspondant à un fonctionnement en régime permanent. La matrice de capacités est caractérisée à la suite de cette première étape.

Des coefficients d'échanges uniformes sont appliqués sur les différentes faces du composant. Les coefficients utilisés sont également définis dans le projet DELPHI et sont assez représentatifs des différents conditions aux limites que le composant peut rencontrer comme indiqué dans les 49 premiers cas test de l'Annexe A. Dans le cas du régime transitoire, le nombre de conditions aux limites est moins important. Les différents scénarios utilisés sont

décrit dans l'Annexe A. Un algorithme génétique est utilisé pour l'obtention des matrices de résistances et de capacités thermiques [3].

## 5. Résultat de la réduction régime transitoire

La simulation numérique du composant détaillé avec tous ses « bondings » est assez lourde. Une première simplification est faite en considérant les « bondings » comme des blocs d'un matériau équivalent, sans pour autant dégrader les performances thermiques du modèle comme nous le verrons dans la suite de l'article. Les caractéristiques thermiques du matériau équivalent sont calculées selon la formule (4),  $\Phi = 11\%$  étant le pourcentage volumique des « bondings » comparé aux blocs.

$$\theta_{\text{équivalent}} = \Phi \cdot \theta_{\text{bondings}} + (1 - \Phi) \cdot \theta_{\text{résine}} \quad (4)$$

La résine représente le matériau englobant du composant.

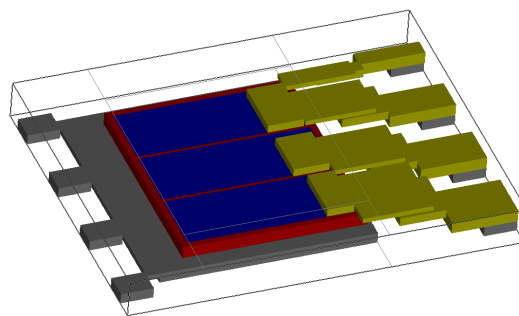


Figure 8 : Composant détaillé simplifié.

Le Tableau 2 donne les matrices de résistances et de capacités à l'issue de l'étape de la réduction, c'est à dire le passage du modèle détaillé au modèle compact dynamique. Il est à noter que des nœuds fictifs supplémentaires  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$  et  $I_4$  ont été rajoutés aux réseaux initiaux. L'intérêt de ces nœuds est d'améliorer la qualité du modèle compact sur les premiers pas de temps.  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$  et  $I_4$  sont respectivement localisés entre les nœuds Jonction – Ti, Jonction – Bi, Jonction – To, Jonction – Bo. Leur position est donnée par l'algorithme génétique. On remarque, par exemple, que le nœud  $I_2$  est pratiquement confondu avec Bi.

Noeuds	Ti	Bi	To	Bo	S
Jonction	589.7	2.147	1203332	2289857	
Ti		39.5			
Bi			68.2	901.8	226.5
To				921.1	87.6
Bo					356.5

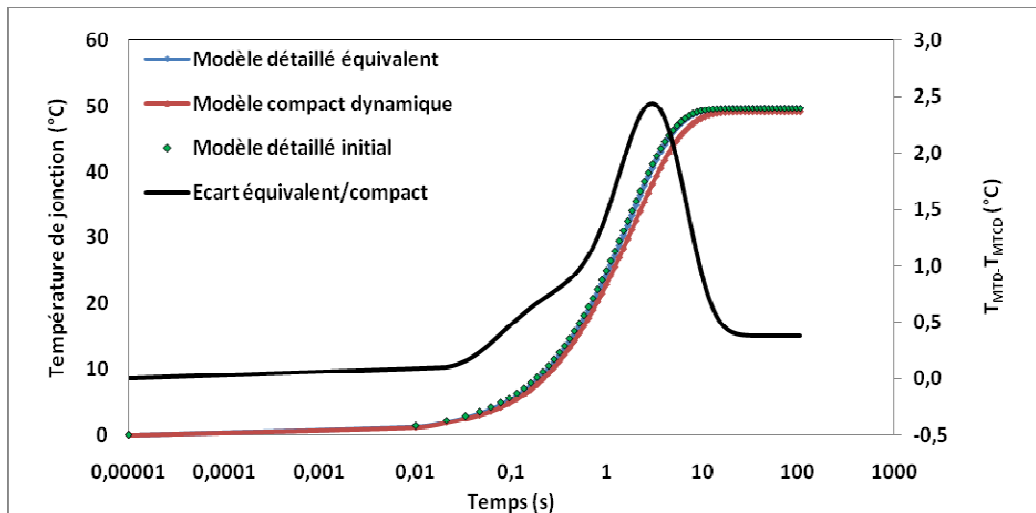
  

		C x 10 <sup>-3</sup>	3.95	1.03	16.5	7.98	0.75	4.33
C x 10 <sup>-3</sup>	Node	Jonction	Ti	Bi	To	Bo	S	
1e <sup>-7</sup>	I <sub>1</sub>	346.56	243.16					
1.21	I <sub>2</sub>	2.147	0					
5.37	I <sub>3</sub>	306			120302			
1e <sup>-7</sup>	I <sub>4</sub>	2289834					22.9	

Tableau 2 : Matrices de résistances et de capacités

Les différents termes des matrices n'ont pas réellement de signification physique. Néanmoins le chemin thermique primordial est respecté, c'est à dire de la jonction vers le Bi qui représente la dissipation thermique du composant vers une partie de la face inférieure. L'inertie thermique globale qui est de  $0.0414 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$  est également conservée par la matrice de capacités dont la somme des différents termes est égale à  $0.0412 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$ .

La Figure 9 donne la représentation graphique des divers modèles sur le cas test aléatoire.



**Figure 9 : Divers modèles thermiques du powerpak avec « bondings »**

Nous remarquons que les courbes du « modèle initial » et du « modèle détaillé équivalent » sont pratiquement confondues. Cela valide l'hypothèse sur la simplification imposée pour avoir un modèle moins gourmand en temps de calcul.

Par ailleurs, la divergence entre le « modèle initial » et le « modèle compact dynamique » est assez faible, elle représente moins de 2.5 °C sur tout les pas de temps.

La méthodologie pour obtenir des modèles compacts dynamiques peut également être étendue à des composants multi-sources [4].

## 6. Conclusions

La modélisation des « bondings » pour les composants électroniques de la famille des « powerpaks » est plus que nécessaire pour avoir des modèles détaillés plus conformes aux modèles réels. Sans cette prise en compte, l'erreur sur l'estimation de la température est assez importante.

Néanmoins la modélisation numérique détaillée est très lourde. Il est donc recommandé d'utiliser des modèles simplifiés appelés modèles thermiques compacts dynamiques afin d'obtenir des temps de simulation plus raisonnables. L'erreur générée par ces modèles est inférieure à 10 % sur tous les pas de temps.

## References:

- [1] SHIDORE S., SAHRAPOUR A., DELPHI Compact Models Revolutionize Thermal Design, Flomerics.
- [2] WHARTON McDaniel, Thermal Performance of power MOSFET packages, Vishay Siliconix.
- [3] MONIER-VINARD E. , DIA C.T and al., Extension of the DELPHI Methodology to Dynamic Compact Thermal Model of Electronic Component, 17th Int. Workshop on THERMINIC 2011, Paris, 27-29 Septembre 2011, ISBN 978-2-35500-018-8, pp 36-41.
- [4] MONIER-VINARD E., DIA C.T and al., Dynamic Compact Thermal Model for Stacked-Die Components, SEMI-THERM 2012, San Jose, California, USA, 18 – 22 Mars 2012
- [5] SABRY M.N., Compact Thermal Models for electronic Systems, IEEE Transactions on components and packaging technologies, Vol.26, N°1 (2003) pp. 179-185.
- [6] 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.
- [7] 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 Septembre 2000, ISBN 2-913329-51-9, (2000) pp. 235-243.

## Annexe A

Type	Cas test	Face supérieur	Face inférieure	Faces latérales	Pattes	Type	Cas test	Face supérieur	Face inférieure	Faces latérales	Pattes	
Convection Naturelle	1	5	1	5	1	Convection Forcée + Dissipateur Thermique	37	150	5	30	5	
	2	5	10	5	10		38	150	30	30	30	
	3	5	25	5	50		39	150	50	30	50	
	4	5	50	5	50		40	150	200	30	200	
	5	5	50	5	100		41	500	5	200	5	
	6	5	100	5	200		42	500	30	200	30	
	7	15	1	15	1		43	500	50	200	50	
	8	15	10	15	10		44	500	200	200	200	
	9	15	25	15	50		Plaque Froide	45	10	50	10	10 <sup>3</sup>
	10	15	50	15	50			46	10	10 <sup>3</sup>	10	10 <sup>4</sup>
	11	15	50	15	100			47	10 <sup>3</sup>	5	10	50
	12	15	100	15	200			48	10 <sup>4</sup>	50	10	500
Convection Forcée	13	30	5	30	5	Infini	49	10 <sup>9</sup>	10 <sup>9</sup>	10 <sup>9</sup>	10 <sup>9</sup>	
	14	30	30	30	30	Scenario test	50	20	800	10		
	15	30	50	30	50							
	16	30	200	30	200	Scénario Transitoire	1	15	100	5		
	17	80	5	80	5		2	50	250	15		
	18	80	30	80	30		3	800	20	5		
	19	80	50	80	50		4	10 <sup>-8</sup>	10 <sup>-8</sup>	10 <sup>-8</sup>		
	20	80	200	80	200		5	40	1000	15		
	21	200	5	200	5		6	10 <sup>-8</sup>	100	50		
	22	200	30	200	30		7	1000	40	100		
	23	200	50	200	50		8	100	10 <sup>-8</sup>	5		
	24	200	200	200	200		9	15	200	200		
25	25	1	25	1	10		30	200	50			
Convection Naturelle + Dissipateur Thermique	26	25	10	25	10							
	27	25	25	25	50							
	28	25	50	25	50							
	29	25	50	25	100							
	30	25	100	25	200							
	31	75	1	75	1							
	32	75	10	75	10							
	33	75	25	75	50							
	34	75	50	75	50							
	35	75	50	75	100							
	36	75	100	75	200							