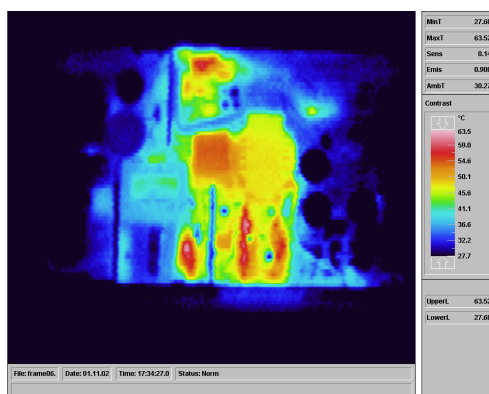


## *Electronique de puissance*

### **Chapitre 9**

## *MODÉLISATION THERMIQUE DES COMPOSANTS DE PUISSANCE*





# T A B L E D E S M A T I E R E S

	<u>PAGE</u>
<b>9. ANALYSE THERMIQUE DES COMPOSANTS DE PUISSANCE.....</b>	<b>1</b>
9.1 RAPPEL THÉORIQUE .....	1
9.1.1 Flux de chaleur.....	1
9.1.2 Équation de continuité .....	1
9.2 MODÈLE THERMIQUE D'UN COMPOSANT DE PUISSANCE.....	2
9.2.1 Modèle électrique équivalent.....	2
9.2.2 Équivalence entre grandeurs électriques et grandeurs thermiques.....	4
9.3 IMPÉDANCE THERMIQUE EFFECTIVE.....	5
9.3.1 Données du fabricant.....	5
9.3.2 Relations mathématiques.....	6
9.4 MODÈLE THERMIQUE ÉLABORÉ .....	9
9.4.1 Généralités .....	9
9.4.2 Structure segmentée du modèle thermique .....	9
9.4.2.1 Hypothèses et contraintes .....	9
9.4.2.2 Circuit équivalent naturel.....	11
9.4.2.3 Circuit équivalent fractionnaire .....	12
9.4.3 Interface composant – refroidisseur.....	13
9.4.4 Paramètres thermiques des matériaux les plus utilisés.....	14
9.5 SIMULATION DU COMPORTEMENT THERMIQUE DES COMPOSANTS DE PUISSANCE .....	15
9.5.1 Généralités .....	15
9.5.2 Exemple : Modélisation d'un MOSFET en tenant compte des effets de la température.....	15
9.5.2.1 Définition du problème.....	15
9.5.2.2 Relations des paramètres électriques avec la température.....	16
9.5.2.3 Modèle de simulation : Exemple d'une dépendance des paramètres à la température .....	17

Bibliographie



## 9. ANALYSE THERMIQUE DES COMPOSANTS DE PUISSANCE

### 9.1 RAPPEL THÉORIQUE

#### 9.1.1 Flux de chaleur

Si un conducteur thermique unidimensionnel est mis en contact avec deux sources de chaleur de température  $T_1 > T_2$ , il s'établit un flux de chaleur  $J=J(x,t)$  défini comme la quantité de chaleur [J] traversant une surface unité [ $m^2$ ] par unité de temps [s]. Le transport va de la source chaude vers la source froide (augmentation de l'entropie : 2<sup>ème</sup> principe de la thermodynamique). L'expérience montre qu'en régime stationnaire  $\partial T / \partial t = 0$ ,  $J$  est proportionnel à la différence de température, mais inversement proportionnel à la longueur du conducteur.

$$J = -\lambda_{th} \frac{T_2 - T_1}{x_2 - x_1} \quad [W/m^2] \quad 9.1$$

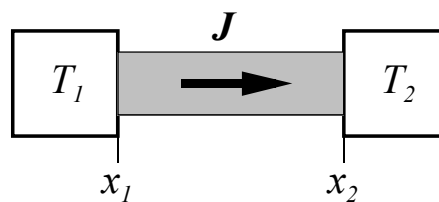


Figure 9-1 : Conducteur thermique entre deux source de chaleur

$\lambda_{th}$  est la conductivité thermique du matériau mesurée en [ $W/m^{\circ}K$ ]. Le flux de chaleur est donc proportionnel au gradient de  $T$ , forme locale retenue pour les situations générales où  $T$  et  $J$  sont variables avec le lieu et le temps :

$$J(x,t) = -\lambda_{th} \frac{\partial T}{\partial x} \quad (\text{loi de Fourier}) \quad 9.2$$

#### 9.1.2 Équation de continuité

Si le flux de chaleur varie entre deux positions proches  $x$  et  $x+\Delta x$ , de la chaleur est déposée dans le volume traversé  $S\Delta x$ . Pendant  $\Delta t$ , la quantité déposée est :

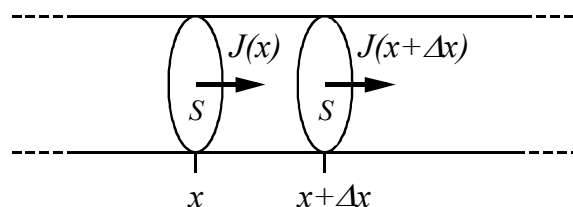


Figure 9-2 : Distribution linéique du flux de chaleur

$$\Delta Q = (J(x) - J(x + \Delta x)) \cdot S \cdot \Delta t = -\frac{\partial J}{\partial x} \cdot \Delta x \cdot S \cdot \Delta t \quad [J] \quad 9.3$$

Pendant ce même temps, la température de la masse  $\rho S \Delta x$ , avec  $\rho$  la masse volumique, s'élève de  $\Delta T$  de manière à absorber la quantité de chaleur  $\Delta Q$ .

$$\Delta Q = \Delta T \cdot c \cdot \rho \cdot S \cdot \Delta x = \frac{\partial T}{\partial t} \cdot \Delta t \cdot c \cdot \rho \cdot S \cdot \Delta x \quad 9.4$$

$c$  [J/(°K·kg)] étant la capacité thermique massique du matériau. A l'aide des relations 9.3 et 9.4 on peut écrire l'équation de continuité :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{1}{\rho \cdot c} \cdot \frac{\partial J}{\partial x} \quad 9.5$$

Cette relation exprime la conservation de l'énergie au cours du transport.

En éliminant  $J$  entre les relations 9.2 et 9.5, on obtient l'équation de diffusion pour un cas unidimensionnel

$$\frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = \frac{\lambda_{th}}{\rho \cdot c} \cdot \frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} \quad 9.6$$

## 9.2 MODÈLE THERMIQUE D'UN COMPOSANT DE PUISSANCE

### 9.2.1 Modèle électrique équivalent

Fondamentalement, la propagation de la chaleur issue d'un composant électronique peut s'effectuer de trois manières :

- par conduction,
- par convection,
- par radiation.

En principe, dans le cas qui nous préoccupe, la conduction représente la très grande partie de l'évacuation de la chaleur. On fait également l'hypothèse que le lieu de transmission est unidirectionnel et homogène. La relation 9.6, écrite sous une autre forme correspond à l'hypothèse énoncée.

$$\frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} = \frac{\rho \cdot c}{\lambda_{th}} \cdot \frac{\partial T(x,t)}{\partial t} \quad 9.7$$

on rappelle ici que

- $\lambda_{th}$  : conductivité thermique du matériau [W/m·°K]
- $c$  : capacité thermique spécifique [J/(kg·°K)]
- $\rho$  : masse volumique du matériau [kg/m<sup>3</sup>]

La recherche d'un modèle électrique correspondant nous amène à considérer une ligne de transmission représentée sous la forme

$$\frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} = C' L' \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2} + (C' R' + G' L') \frac{\partial u(x,t)}{\partial t} + G' R' u(x,t) \quad 9.8$$

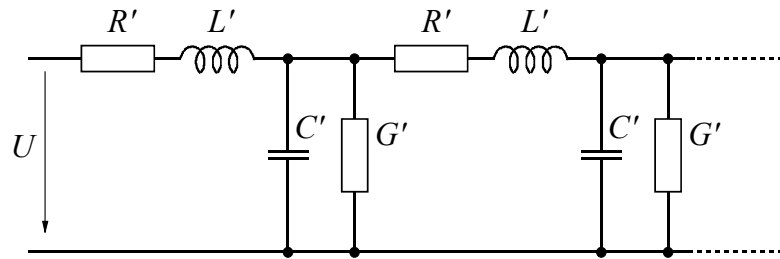


Figure 9-3 : Ligne de transmission

- $C'$  : capacité linéique ( $[F/m]=[As/(V \cdot m)]$ )
- $R'$  : résistance linéique ( $[\Omega/m]=[V/(A \cdot m)]$ )
- $G'$  : conductance transverse linéique ( $[1/(\Omega \cdot m)]=[A/(V \cdot m)]$ )
- $L'$  : inductance linéique ( $[H/m]=[V \cdot s/(A \cdot m)]$ )

En posant la capacité linéique  $C'$  et la résistance linéique  $R'$  nulles, on obtient :

$$\frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} = L'G' \frac{\partial u(x,t)}{\partial t} \tag{9.9}$$

Le modèle électrique de la ligne de transmission devient :

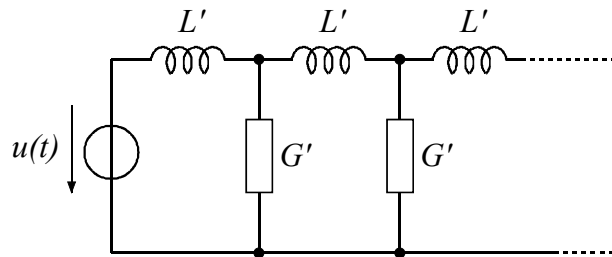


Figure 9-4 : Modèle électrique simplifié de la ligne de transmission

Par le principe de dualité, on peut transformer le modèle de la Figure 9-4 sous la forme suivante :

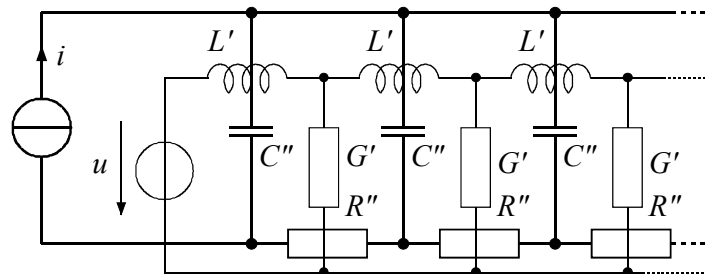


Figure 9-5 : Transformation par le principe de dualité

et la relation 9.9 devient :

$$\frac{\partial^2 i(x,t)}{\partial x^2} = R''C'' \frac{\partial i(x,t)}{\partial t} \tag{9.10}$$

La structure de la relation 9.10 est semblable à celle de la transmission de la chaleur dans un milieu homogène.

## 9.2.2 Équivalence entre grandeurs électriques et grandeurs thermiques

L'équivalence entre grandeurs thermiques et électriques peut être définie par le tableau suivant.

Grandeurs thermiques			Grandeurs électriques		
T :	Température	[°K]	U	Tension	[V]
J	Flux de chaleur	[W/m <sup>2</sup> ]	J	Densité de courant	[A/m <sup>2</sup> ]
P	Chaleur	[W]	I	Courant	[A]
Q	Quantité de chaleur	[J]=[W·s]	Q	Charge	[C]=[A·s]
$\lambda_{th}$	Conductivité	[W/(°K·m)]	$\sigma$	Conductivité	[1/( $\Omega$ ·m)]
$R_{th}$	Résistance	[°K/W]	R	Résistance	[V/A] = [ $\Omega$ ]
$C_{th}$	Capacité	[W·s/°K]	C	Capacité	[A·s/V] = [F]

--	--

Table 9-1 : Définition des grandeurs physiques

Les relations principales sont définies comme

Grandeurs thermiques	Grandeurs électriques
$C_{th} = \frac{dQ}{dT}$	$C = \frac{dQ}{dU}$
$C_{th} = c \cdot \rho \cdot d \cdot S$	$C = \epsilon \cdot \frac{S}{d}$
$R_{th} = \frac{d}{\lambda_{th} \cdot S}$	$R = \frac{d}{\sigma \cdot S}$
$Q(t) = \int_0^t p(t) \cdot dt$	$Q(t) = \int_0^t i(t) \cdot dt$
$p(t) = \frac{T_A(t) - T_B(t)}{R_{th}} + C_{th} \frac{d}{dt} (T_A(t) - T_B(t))$	$i(t) = \frac{u_A(t) - u_B(t)}{R} + C \frac{d}{dt} (u_A(t) - u_B(t))$

Table 9-2 : Relations entre grandeurs physiques



L'analogie avec la ligne de transmission nous oblige à considérer les capacités et les résistances thermiques comme des grandeurs rapportées à une unité de longueur. De plus (contrairement aux conventions électriques : *dans un dipôle le courant entrant est positif*), pour le schéma thermique équivalent, nous considérerons comme positif la chaleur sortant du dipôle représenté par la source de chaleur  $p$ .

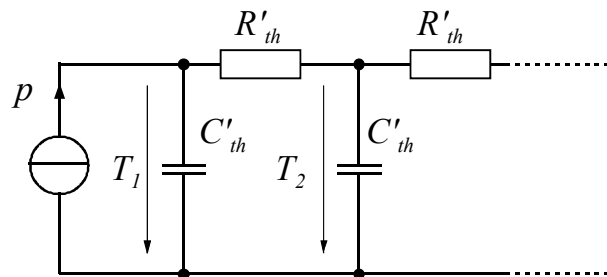


Figure 9-6 : Modèle thermique

Il est cependant possible de simplifier le modèle en considérant chaque condensateur et chaque résistance thermique comme des éléments décrivant un volume homogène. Dans ce cas on peut représenter un cas particulier par la structure segmentée illustrée à la Figure 9-7

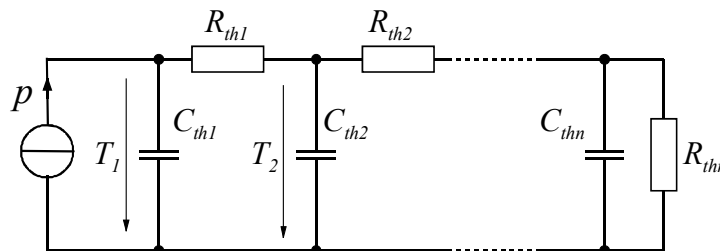


Figure 9-7 : Modèle thermique segmenté d'un cas réel

### 9.3 IMPÉDANCE THERMIQUE EFFECTIVE.

#### 9.3.1 Données du fabricant

La plupart des fabricants de composants électroniques donnent les indications thermiques suivantes

Thermal Characteristics					
Parameter	Symbol	Values			Unit
		min.	typ.	max.	
<b>Characteristics</b>					
Thermal resistance, junction - case	$R_{thJC}$	-	-	0.6	K/W
Thermal resistance, junction - ambient, leaded	$R_{thJA}$	-	-	62	

Figure 9-8 : Résistances thermiques

Les résistances thermiques permettent le dimensionnement autour d'un point de fonctionnement continu.

$R_{thJC}$  : Résistance thermique Jonction – Boîtier (semelle de cuivre utilisée pour

le refroidissement par conduction au moyen d'un radiateur).

$R_{thJA}$  : Résistance thermique Jonction – Air ambiant (composant monté sans contact avec un refroidisseur. Seule la convection naturelle entre en jeu).

Pour un train d'impulsions, comme il est d'usage en pratique, le fabricant donne une courbe illustrant l'impédance thermique  $Z_{thJC}(t)$  effective rapportée à la fréquence et au rapport cyclique du train d'impulsions rectangulaires de puissance dissipée dans le composant. Sur cette courbe on voit que pour des impulsions  $t_p$  supérieures à 100ms, la valeur de l'impédance thermique tend vers la valeur de la résistance thermique.

$$Z_{thJC} \Big|_{t_p > 100ms} \rightarrow R_{thJC} \tag{9.11}$$

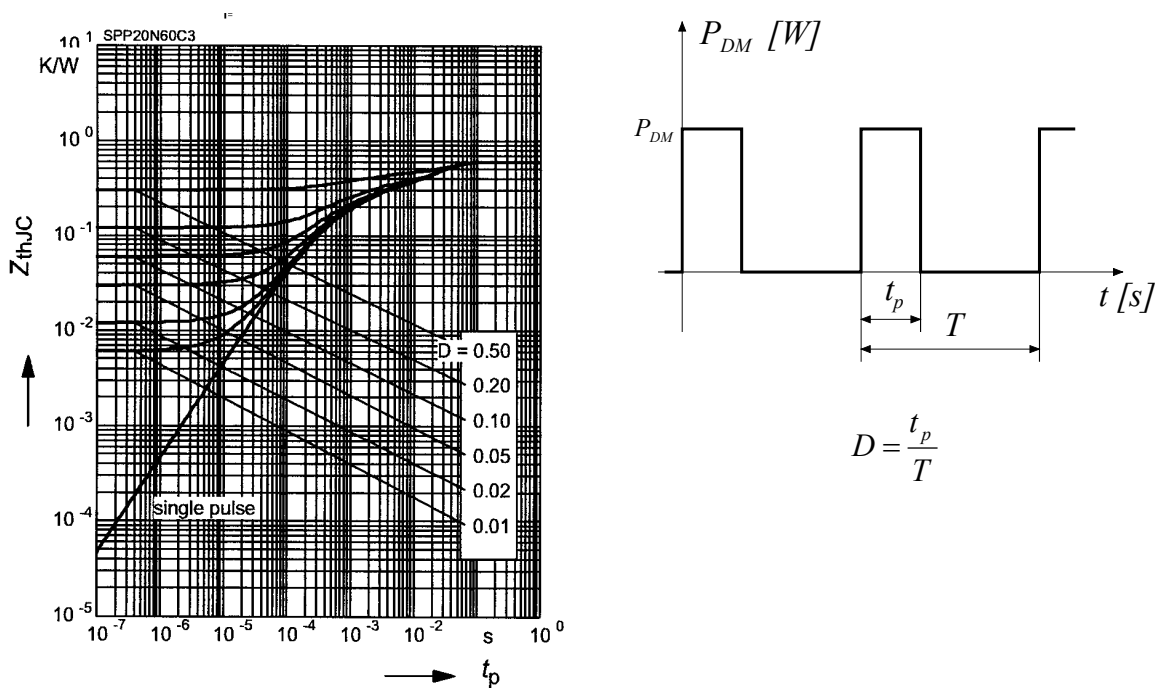


Figure 9-9 : Impédance thermique effective Jonction – Boîtier pour un train d'impulsions

La Figure 9-10 illustre le modèle thermique simplifier utilisé par la plupart des fabricants.

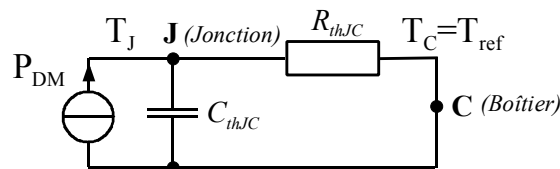


Figure 9-10 : Modèle électrique équivalent du circuit thermique d'un composant de puissance

### 9.3.2 Relations mathématiques

Il est à remarquer que la température  $T$  est définie comme un accroissement de température par rapport à une température de référence  $T_{ref}$ .

On peut calculer une impédance thermique équivalente dont la valeur dépend d'une part du temps pendant lequel la source de chaleur  $P_{DM}$  est active et d'autre part de la fréquence du train

d'impulsions ou de son rapport cyclique  $D$ . Considérons, la réponse thermique à un train d'impulsions de puissance.

Durant le temps  $t_p$ , d'apparition d'une impulsion de puissance, la température, côté source de chaleur croît selon la relation

$$T(t) = P_{DM} \cdot R_{thJC} (1 - e^{-t/R_{thJC} \cdot C_{thJC}}) + T_{MIN} \cdot e^{-t/R_{thJC} \cdot C_{thJC}} \quad 9.12$$

Durant l'absence de source de chaleur, la température décroît selon la relation

$$T(t) = T_{MAX} \cdot e^{-t/R_{thJC} \cdot C_{thJC}} \quad 9.13$$

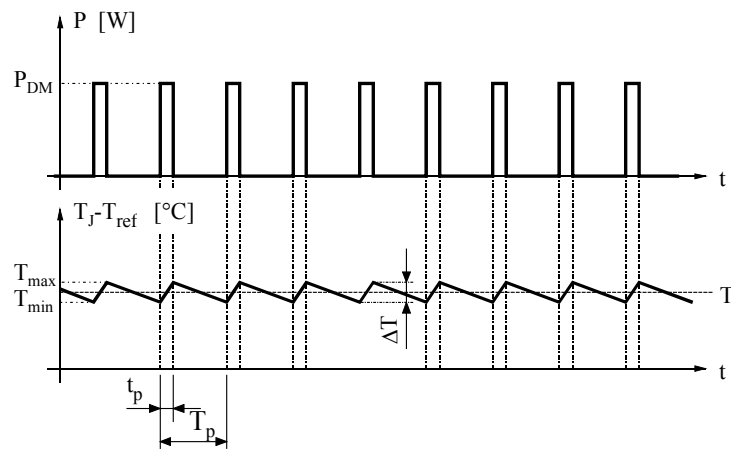
De la relation 9.12, on a pour la température maximum

$$T_{MAX} = T(t_0 + t_p) = P_{DM} \cdot R_{thJC} (1 - e^{-t_p/R_{thJC} \cdot C_{thJC}}) + T_{MIN} \cdot e^{-t_p/R_{thJC} \cdot C_{thJC}} \quad 9.14$$

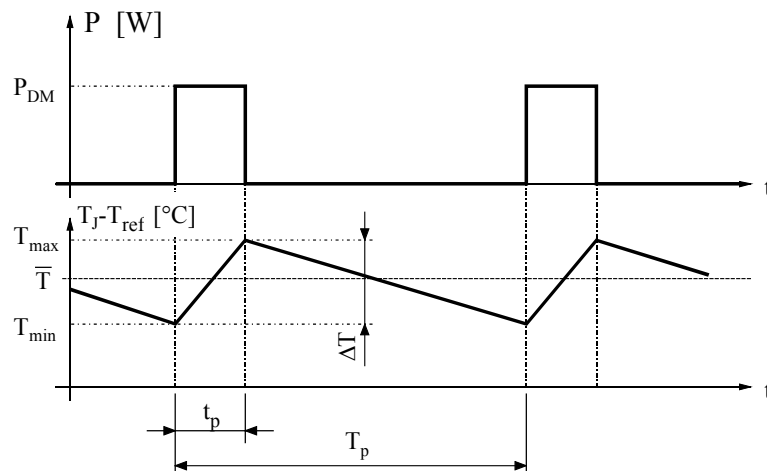
et de la relation 9.13, on a pour la température minimum

$$T_{MIN} = T(t_0 + T_p) = T_{MAX} \cdot e^{-(T_p - t_p)/R_{thJC} \cdot C_{thJC}} = T_{MAX} \cdot e^{-t_p \cdot (1-D)/D \cdot R_{thJC} \cdot C_{thJC}} \quad 9.15$$

avec  $D = t_p / T_p$ , le rapport cyclique.



(a)  $t_p = 1ms, D = 0.25$



(a)  $t_p = 5ms, D = 0.25$

Figure 9-11 : Réponse thermique à un train d'impulsions de chaleur

Finalement, à l'aide des relations 9.14 et 9.15, on obtient pour la température maximum

$$T_{MAX} = P_{DM} \cdot R_{thJC} \frac{1 - e^{-t_p / R_{thJC} \cdot C_{thJC}}}{1 - e^{-t_p / D \cdot R_{thJC} \cdot C_{thJC}}} \quad 9.16$$

puis pour la température minimum

$$T_{MIN} = P_{DM} \cdot R_{thJC} \frac{1 - e^{-t_p / R_{thJC} \cdot C_{thJC}}}{1 - e^{-t_p / D \cdot R_{thJC} \cdot C_{thJC}}} \cdot e^{-t_p \cdot (1-D) / D \cdot R_{thJC} \cdot C_{thJC}} \quad 9.17$$

Les relations 9.16 et 9.17 montrent que pour un rapport cyclique  $D=1$ , le flux de chaleur  $P$  est constant et dans ce cas  $T_{MAX}=T_{MIN}=P_{DM} \cdot R_{thJC}$ .

La relation 9.18 permet de définir la température moyenne de la source de chaleur

$$\bar{T} = \frac{1}{T_p} \cdot \int_0^{T_p} T(t) \cdot dt, \text{ avec } T_p = \frac{t_p}{D} \quad 9.18$$

qui vaut après quelques calculs

$$T = P_{DM} \cdot R_{thJC} \cdot D. \quad 9.19$$

La définition de l'impédance thermique est donnée par la relation suivante :

$$T_{MAX} = P_{DM} \cdot Z_{thJC} \quad 9.20$$

avec

$$Z_{thJC}(t_p) = \frac{1 - e^{-t_p / R_{TH} \cdot C_{TH}}}{1 - e^{-t_p / D \cdot R_{TH} \cdot C_{TH}}} R_{thJC} \quad 9.21$$

L'impédance thermique effective Jonction (Junction) et Boîtier (Case) dépend de la durée  $t_p$  de conduction (durée d'activation de la source de chaleur  $P$ ) et du rapport cyclique  $D$ . La relation 9.21 peut être illustrée par le graphe de la Figure 9-12.

En recherchant  $T_{MAX}$  à l'aide de la relation 9.16 ou du graphe et de la relation 9.20, et en y ajoutant la température de référence  $T_{ref}$ , qui dans ce cas est la température du boîtier  $T_C$ , il est possible de connaître la température maximum de la jonction  $T_{JMAX}$ . C'est en effet cette température qui est la contrainte thermique majeure pour le semiconducteur.

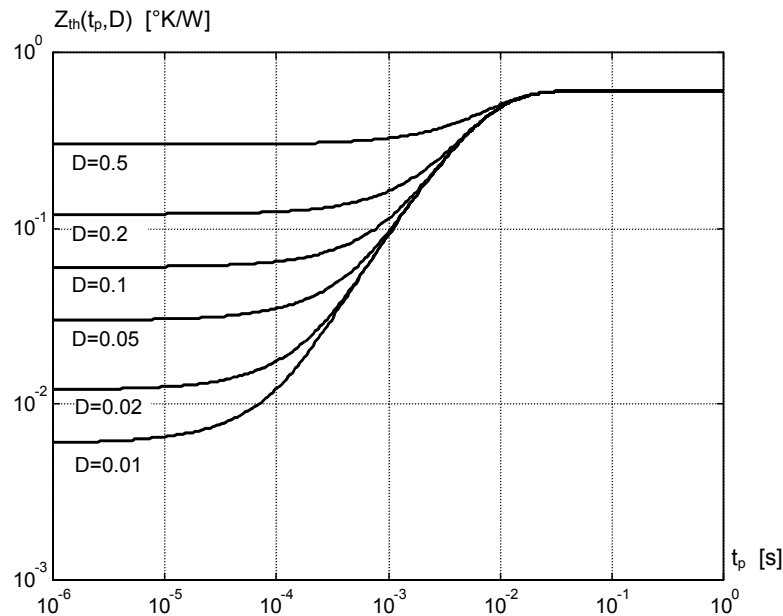


Figure 9-12 : Impédance thermique effective ( $R_{th}=0.6^{\circ}K/W$ ,  $C_{th}=10mWs/^{\circ}K$ )

## 9.4 MODÈLE THERMIQUE ÉLABORÉ.

### 9.4.1 Généralités

La modélisation thermique d'un composant est une opération complexe faisant appel à l'analyse par éléments finis. Une telle démarche n'est pas réaliste dans la plupart des cas. Les fabricants permettent de contourner ce problème en proposant des valeurs de résistances et de capacités thermiques en segmentant le volume du composant en plusieurs parties significatives.

### 9.4.2 Structure segmentée du modèle thermique

#### 9.4.2.1 Hypothèses et contraintes

La pratique montre qu'une segmentation de la structure du semiconducteur de puissance en volumes partiels est possible pour autant que les points suivants soient respectés

1. L'épaisseur et la succession des couches doivent être choisies de manière à ce que la constante thermique de chacune d'elles aille dans le sens croissant ( $\tau_{th} = C_{th}R_{th}$ ) dans la direction de propagation de la chaleur. La meilleure qualité de résultat est obtenue pour une croissance de cette constante de temps d'un facteur 2 à 8 entre deux couches successives.
2. La surface du silicium où est produite la chaleur est petite. Si les matériaux prévus pour le refroidissement par conduction sont homogènes, il y a un effet de diffusion latérale. La pratique montre que cette diffusion peut être décrite par un angle d'expansion de  $\alpha=40^{\circ}$ . Il y a cependant une restriction si une couche présente une basse conductivité thermique (effet d'accumulation).

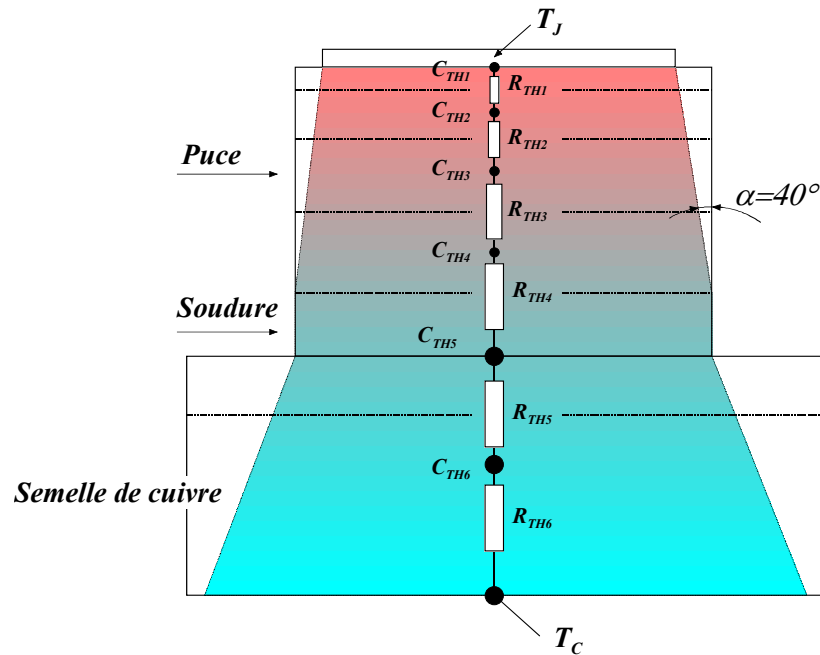


Figure 9-13 : Structure du modèle thermique d'un semiconducteur de puissance

3. Les dimensions et les caractéristiques thermiques de chaque élément de volume traversé par le flux de chaleur doivent être déterminées précisément car la capacité thermique de ces derniers a une influence décisive sur l'impédance thermique du système lorsque la puissance à dissiper est le résultat d'impulsions de courtes durées. Le circuit équivalent montre que les capacités thermiques de ces volumes apparaissent toujours parallèlement au flux de chaleur. Dans les MOSFET de puissance, les premières couches correspondant à la zone N<sup>-</sup> épitaxiale sont sources de chaleur. Pour des géométries complexes, le modèle thermique ne représente que grossièrement la réalité. Dans ce cas il peut être nécessaire de recourir à une analyse par éléments finis. Il est également possible pour un composant, qui est disponible au moins sous la forme de prototype, de paramétrer les éléments du circuit équivalent basé sur une mesure et une comparaison du profil de température de jonction  $T_J$ . La procédure pratique habituelle est de chauffer le composant en contrôlant la dissipation de puissance  $P_J$  dans ce dernier jusqu'à ce qu'il atteigne une température de jonction stationnaire  $T_J$ . En principe, la connaissance de la température est donnée par une mesure indirecte. En effet, on connaît la dépendance de la température de plusieurs paramètres du composant. Généralement on mesure la tension de passage  $V_F$  d'une diode intégrée à la structure. En supprimant la puissance dissipée (source de chaleur), il est possible de tracer la courbe de refroidissement  $T_J(t)$  et donc de connaître l'impédance thermique transitoire du composant

$$Z_{th}(t) = \frac{T_{Ji} - T_J(t)}{P_i} \quad 9.22$$

Cette impédance thermique transitoire correspond à la réponse indicielle du système et par conséquent contient la description de son comportement thermique.

En première approximation on considère ce système comme linéaire aussi longtemps que l'on ignore la dépendance à la température des matériaux spécifiques, en particulier celui de la conductance de la chaleur de silicium.

Une fois l'impédance thermique transitoire connue, il est possible de connaître la température de la jonction  $T_J$  pour n'importe quel profil de la puissance dissipée. En effet grâce au produit de convolution, on peut écrire

$$T_J(t) = T_{J0} + \int_0^t P(\tau) dZ_{th}(t - \tau) d\tau \quad 9.23$$

avec :  $T_{J0}$  : Température initiale ( $t=0$ ) de la jonction  
 $dZ_{th}(t)$  : Différentielle de la réponse indicielle de l'impédance thermique (réponse impulsionnelle pas directement mesurable)

Pour être capable d'utiliser les résultats de la mesure thermique en simulation, il est nécessaire de trouver un réseau équivalent électrique dont la réponse indicielle décrit l'impédance thermique transitoire  $Z_{th}(t)$ .

Si seul le profil de la température de jonction  $T_J$  présente de l'intérêt, il existe un nombre illimité de réseaux électriques équivalents permettant un ajustement de la courbe de refroidissement avec l'exactitude exigée. Parmi ce grand nombre de réseaux possibles, il y a deux topologies dominantes.

#### 9.4.2.2 Circuit équivalent naturel

Le circuit de conduction de la chaleur équivalent dit naturel est dérivé de la théorie des lignes de transmission. C'est le seul réseau qui décrit correctement la distribution de la température interne du système et permet une corrélation claire entre éléments équivalents et les éléments physiques (puce, soudure, semelle métallique de refroidissement, etc.). La Figure 9-14 montre un exemple extrait d'un data sheet.

Transient Thermal Characteristics					
Symbol	Value	Unit	Symbol	Value	Unit
	typ.			typ.	
Thermal resistance			Thermal capacitance		
$R_{th1}$	0.00746	K/W	$C_{th1}$	0.000439	Ws/K
$R_{th2}$	0.017		$C_{th2}$	0.00145	
$R_{th3}$	0.028		$C_{th3}$	0.00239	
$R_{th4}$	0.065		$C_{th4}$	0.00499	
$R_{th5}$	0.081		$C_{th5}$	0.021	
$R_{th6}$	0.037		$C_{th6}$	0.146	

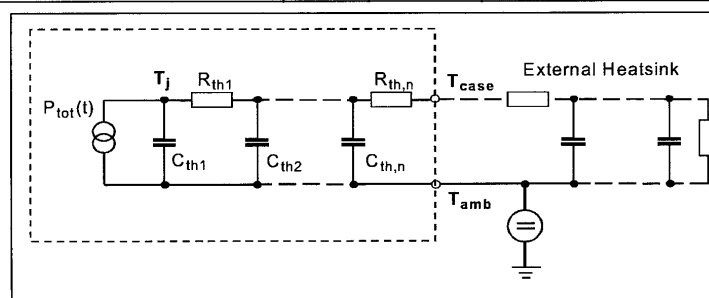


Figure 9-14 : Paramètres du modèle thermique d'un MOSFET

La fonction de transfert est donnée sous la forme :

$$Z_{th}(s) = \frac{1}{sC_{th1} + \frac{1}{R_{th1} + \frac{1}{sC_{th2} + \frac{1}{R_{th2} + \frac{1}{sC_{th3} + \dots + \frac{1}{R_{thn}}}}}}} \quad 9.24$$

#### 9.4.2.3 Circuit équivalent fractionnaire

La plupart des fabricants utilisent le réseau équivalent illustré à Figure 9-15. Les éléments RC individuels représentent les termes d'une division fractionnaire partielle de la fonction de transfert thermique du système, par contre l'ordre des termes individuels est arbitraire. L'originalité de ce réseau est sa forme mathématiquement simple, dont la réponse indicielle est donnée par :

$$Z_{th}(t) = \frac{R_{th1}}{1 + sR_{th1}C_{th1}} + \frac{R_{th2}}{1 + sR_{th2}C_{th2}} + \dots + \frac{R_{thn}}{1 + sR_{thn}C_{thn}} \quad 9.25$$

$$= \sum_{K=1}^n R_{kth} \left( 1 - e^{-\frac{t}{R_{kth}C_{kth}}} \right)$$

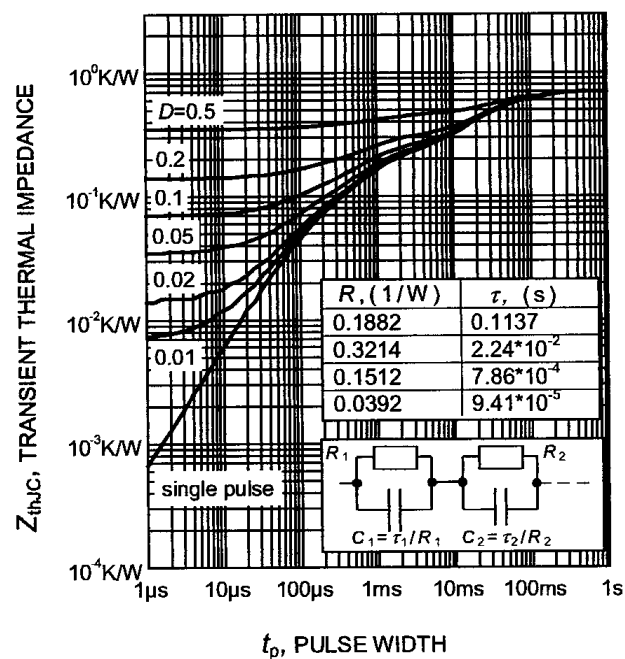


Figure 9-15 : Paramètres du modèle thermique d'un IGBT

Cette propriété simplifie la détermination des valeurs des éléments du schéma équivalent et le calcul de sa réponse indicielle. Ceci explique la popularité de ce réseau équivalent.



Malheureusement, si ce le réseau est capable de décrire correctement le comportement thermique à son entrée, il faut le considérer comme une boîte noire. En effet la structure interne du réseau n'a pas de correspondance physique. Dans ce cas la distribution de la température à l'intérieur du réseau équivalent n'a aucune signification.

En conséquence, il est impossible d'ouvrir le réseau au point  $x$  pour l'étendre (par exemple avec le circuit thermique équivalent d'un refroidisseur). Dans ce cas, le réseau entier doit être recalculer, modifiant du même coup l'ensemble des couples  $R_{th}$ ,  $C_{th}$ . On peut démontrer cette assertion de la manière suivante. Ouvrons le nœud  $x$  pour y placer le circuit équivalent d'un refroidisseur sous la forme d'un couple  $R_{th}$ ,  $C_{th}$  et supposons un saut indiciel de la température de jonction  $T_J$ . On voit immédiatement que ce saut de température est partiellement reporté (diviseur capacitif) sur la sortie, ce qui est physiquement impossible. De plus le circuit équivalent montre que l'énergie emmagasinée dans les capacités thermiques dépend de la différence de température entre deux nœuds adjacents alors que, dans réalité, la chaleur stockée est proportionnelle à la température absolue d'un élément du volume.

### 9.4.3 Interface composant – refroidisseur

Le modèle par segmentation de la structure du semiconducteur de puissance en volumes partiels doit répondre à un certain nombre de contraintes énumérées au §9.4.2. L'interface composant – refroidisseur, constituée d'une feuille isolante ne répond pas aux exigences sur la croissance de la constante de temps entre deux couches successives (§9.4.2. point 2). On peut contourner ce point de la manière suivante.

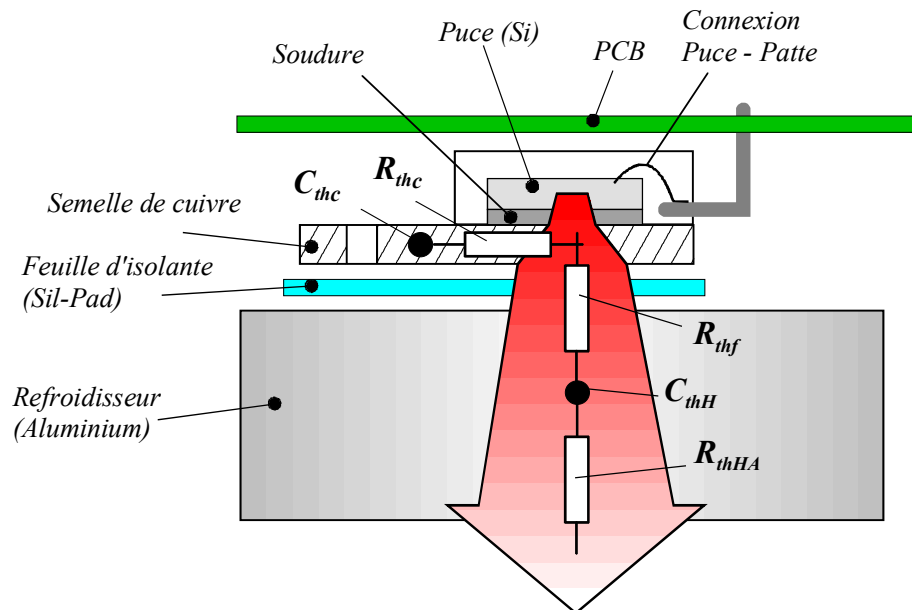


Figure 9-16 Exemple de montage d'un composant de puissance

L'effet d'accumulation provoqué par la résistance thermique "élevée" de la feuille isolante, suite à un compromis entre isolation électrique et conduction thermique, peut se modéliser selon la forme illustrée par la Figure 9-17

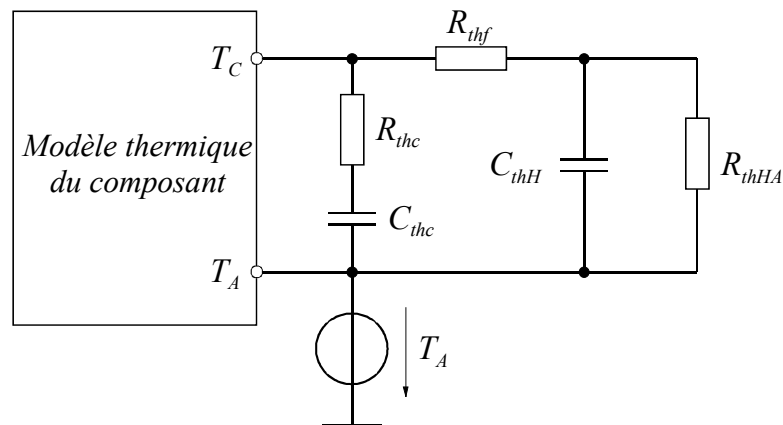


Figure 9-17 : Modèle thermique de l'interface et du refroidisseur

#### 9.4.4 Paramètres thermiques des matériaux les plus utilisés

Le tableau suivant donne un aperçu des valeurs numériques des paramètres des matériaux les plus utilisés en électronique.

	$\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/(m°K)]	$c$ [J/(g°K)]
Silicium	2.4	140	0.7
Soudure (Sn-Pb)	9	60	0.2
Cu	7.6 ... 8.9	310 ... 390	0.385 ... 0.42
Al	2.7	170 ... 230	0.9 ... 0.95
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.8	24	0.8
FR4	-	0.3	-
Pâte conductrice	-	0.4 ... 2.6	-
Feuille isolante	-	0.9 ... 2.7	-

Table 9-3 : Caractéristiques des matériaux

## 9.5 SIMULATION DU COMPORTEMENT THERMIQUE DES COMPOSANTS DE PUISSANCE

### 9.5.1 Généralités

Vu la complexité mathématique du modèle thermique présenté à la section 9.2, il devient utopique de vouloir calculer les températures de Jonction et de Boîtier d'un composant de puissance soumis à un régime électrique quelconque. De plus, la plupart de paramètres électriques du composant ont une dépendance vis à vis de la température qui impose un calcul itératif. Les outils de simulation possèdent les modèles adéquats pour qu'une telle modélisation soit possible. Le vieux rêve des designers qui consiste à intégrer les effets de la température dans les modèles de simulation est devenu une réalité.

### 9.5.2 Exemple : Modélisation d'un MOSFET en tenant compte des effets de la température

#### 9.5.2.1 Définition du problème

La plupart des MOSFET de puissance sont réalisés sur la base d'une structure verticale de type DMOSFET (voir chap. 7: Les semiconducteurs de puissance : 2<sup>ème</sup> partie Le MOSFET).

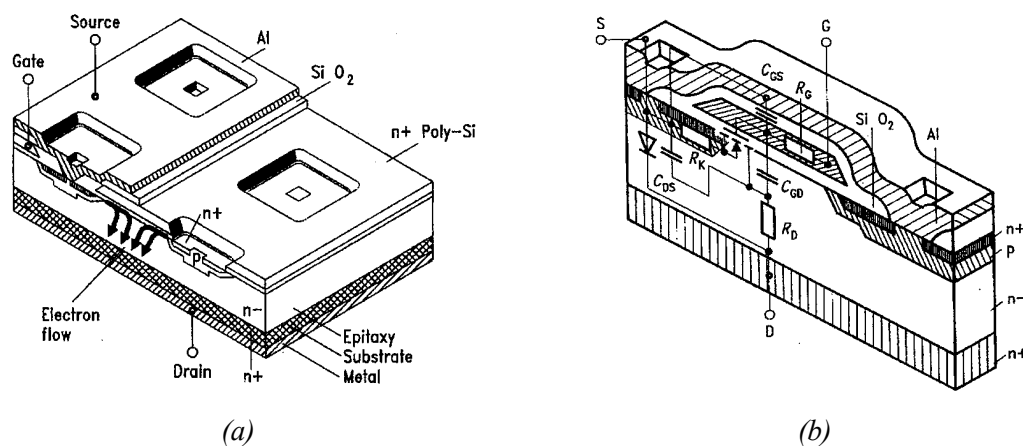


Figure 9-18 : Structure d'un transistor MOSFET

La Figure 9-18 illustre un tel transistor. Bien que ce type de MOSFET soit largement utilisé, sa modélisation a été, pendant longtemps, d'une qualité assez médiocre. En effet la dépendance des paramètres d'un semiconducteur à la température est souvent considérée comme marginale et traitée par des méthodes empiriques, par l'expérience ou la mesure. Dans certaines applications, il est préférable, voir indispensable de modéliser le comportement de semiconducteur de puissance en tenant compte de l'influence de la température.

La température a un impact important sur les paramètres suivants :

- la mobilité  $\mu_e$  des électrons (transconductance  $g_{fs}$ )
- la tension de seuil  $V_{GS(th)}$ ,
- la résistance  $R_{DS(on)}$ .

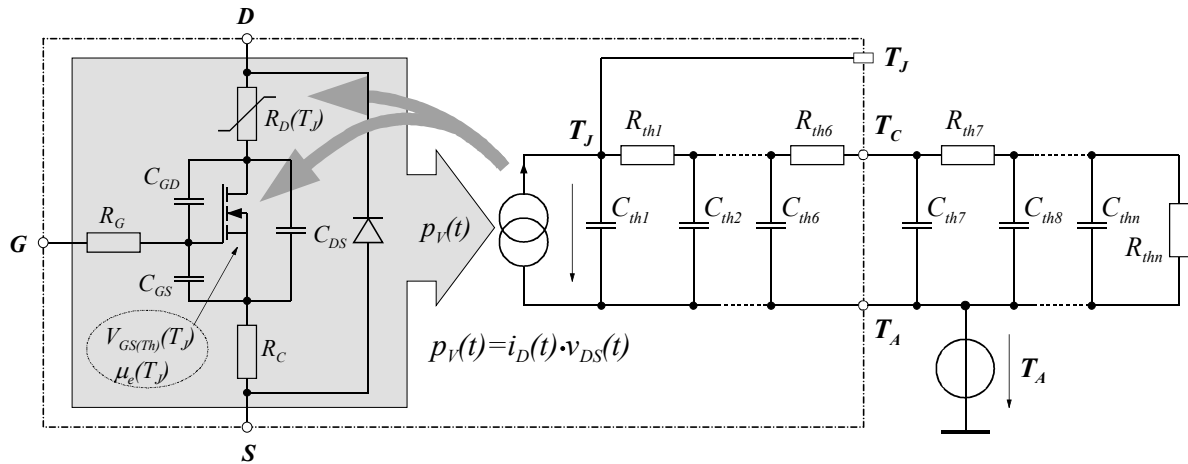


Figure 9-19 : Modèle thermique d'un MOSFET

La Figure 9-19 montre la modélisation thermique d'un MOSFET. La puissance dissipée dans ce dernier, définie par le produit de la tension Drain – Source par le courant de Drain en valeurs instantanées, est représentée par une source de courant contrôlée. Cette source de courant alimente un réseau RC modélisant le comportement thermique du MOSFET et de son refroidisseur.

Le modèle thermique interne au MOSFET est donné dans le data sheet édité par le fabricant et se présente sous la forme de la Figure 9-14.

### 9.5.2.2 Relations des paramètres électriques avec la température

La variation des paramètres électriques en fonction de la température est directement liée à la technologie. En principe les figures des data sheets permettent de définir des lois mathématiques empiriques (dépendantes de la technologie). On peut citer par exemple les relations suivantes :

- Variation de la transconductance avec la température

$$g_{fs}(T_J) = g_{fs(300^{\circ}K)} \left( \frac{T_J}{300} \right)^{-3/2} \quad \text{avec } T_J \text{ en } [^{\circ}K] \quad 9.26$$

- Variation de la tension de seuil avec la température

$$V_{GS(th)}(T_J) = V_{GS(th)}(300^{\circ}C) + \mathcal{G} \cdot (T_J - 300^{\circ}C) \quad 9.27$$

avec  $\mathcal{G} = -8.5mV/^{\circ}K$

- Variation de la résistance  $R_{DS(on)}$  avec la température

$$R_{DS(on)}(T_J) = R_{DS(on)(300^{\circ}K)} \left( 1 + \frac{\alpha}{100} \right)^{(T_J - 300)} \quad T_J \text{ en } [^{\circ}K] \quad 9.28$$

### 9.5.2.3 Modèle de simulation : Exemple d'une dépendance des paramètres à la température

Des relations fixant la dépendance des paramètres principaux avec la température, il est possible de créer un modèle de simulation à partir d'un modèle de composant donné sous forme standard (SPICE, SAUBER, SIMPLORER).

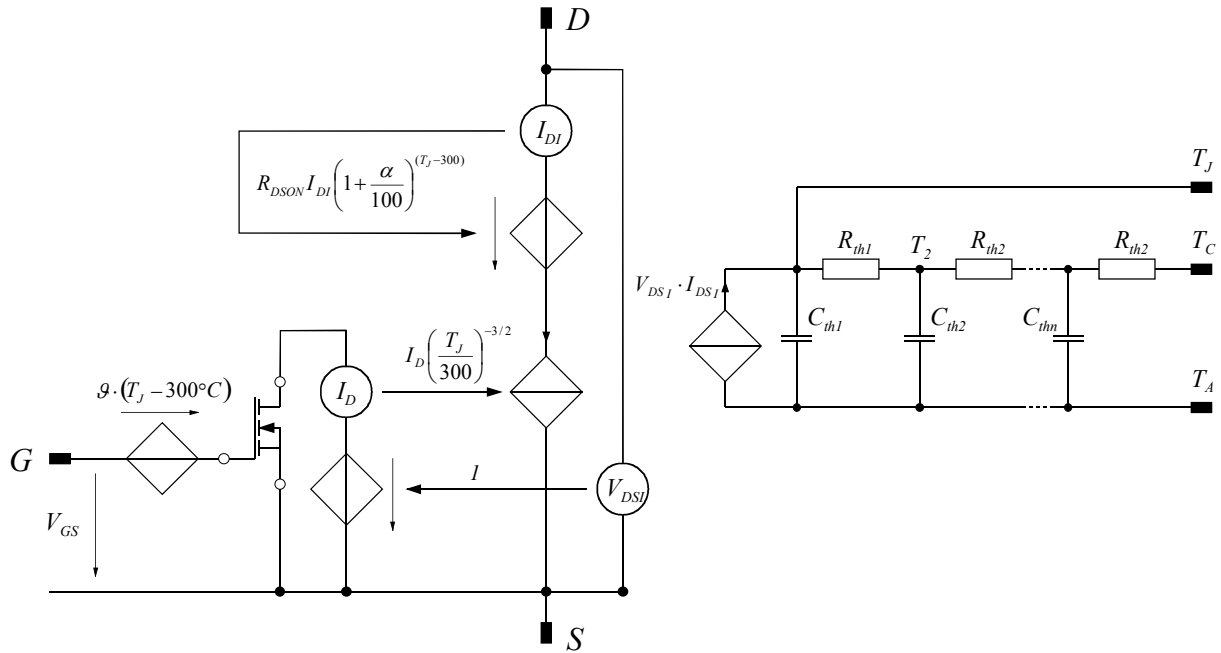


Figure 9-20 Modèle de simulation

On peut donc créer un nouveau modèle de simulation auquel on pourra ajouter un circuit thermique équivalent naturel.

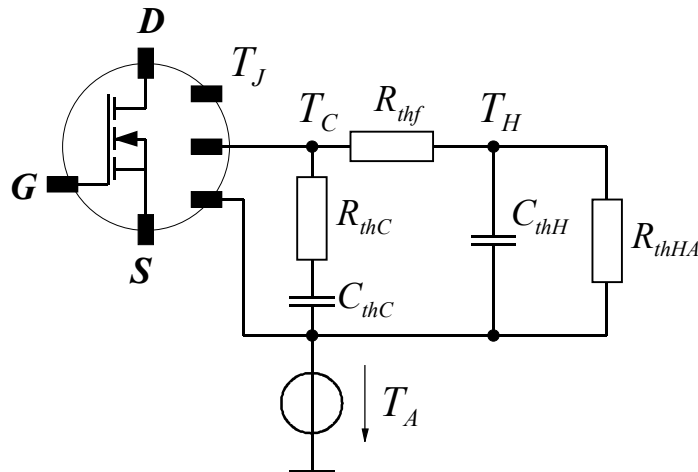


Figure 9-21 Modèle de simulation

Grâce à ce modèle, il est possible de mieux comprendre les raisons pour lesquelles les caractéristiques statiques des composants de puissance sont définies pour des mesures impulsives.

La Figure 9-22 montre l'importance de la dépendance de certains paramètres électriques à la température. La mesure effectuée correspond à la recherche d'un point  $I_D=f(U_{DS},U_{GS})$  sur la caractéristique statique. A la courbe mesurée, on peut observer les simulations avec et sans correction des paramètres les plus dépendants de la température de jonction.

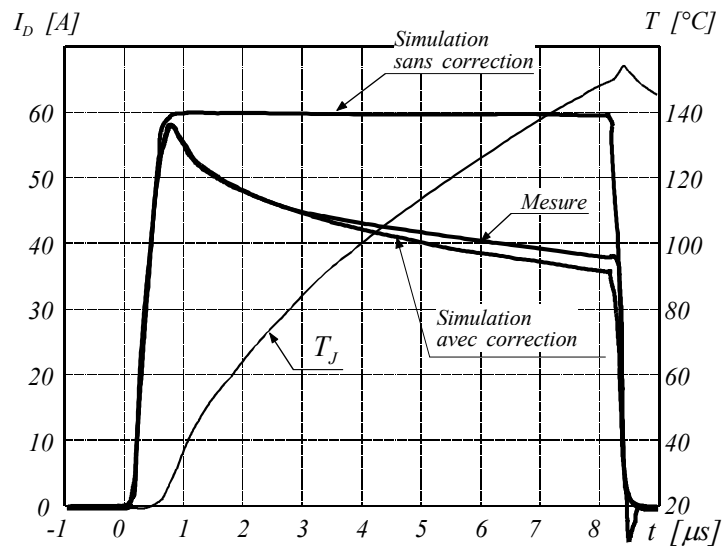


Figure 9-22 Comparaison simulation – mesure

Cette figure prouve qu'il est essentiel de mesurer les caractéristiques électriques d'un composant en minimisant la variation de la température de jonction durant le test.

## Bibliographie

- [1] **Fairchild Semiconductor**  
IGBT BASIC  
Application Note AN9016, February 2000
- [2] **Fairchild Semiconductor**  
MOSFET BASIC  
Application Note AN9010, July 2000
- [3] **Infineon**  
Thermal System modeling  
Application Note, 2001
- [4] **Siemens**  
Requirements for Power MOSFET connected in parallel  
Semiconductor Group