

## Exploiter Pspice et l'analogie thermique / électrique

J'invite le lecteur à consulter le site pour des informations complémentaires.

Page d'accueil du site Internet :

[page d'accueil](#)

d'autres pdf, sur différents sujets :

[liste des PDE](#)

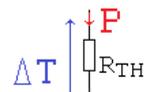
De nombreux phénomènes de la physique appliquée exploitent des équations différentielles linéaires à coefficients constants. D'où une certaine similitude de formulation qui amène à parler d'analogie, ou d'homologie. Parmi les plus connues, citons l'analogie mécanique / électricité, avec les transformations force / courant et force / tension. Nous allons traiter ici l'analogie thermique / électricité, pour résoudre ainsi un problème thermique en exploitant Pspice.

### 1) La loi d'ohm thermique

Elle est issue de la relation de Fourier, en conduction, exploitant le flux de chaleur.

Le flux est homogène à des W. On peut donner une formulation simple à cette relation :

$$\Delta T = R_{TH} P \quad \Delta T \text{ en } ^\circ\text{C}, \quad R_{TH} \text{ en } ^\circ\text{/W}, \quad P \text{ en W}$$



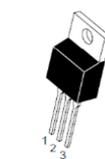
L'analogie avec la loi d'Ohm électrique est évidente. Mais la grandeur qui « circule » est ici la puissance. Une conséquence directe de la loi d'Ohm est de pouvoir naturellement utiliser la notion de série, parallèle.

Un domaine connu de la loi d'ohm thermique est l'isolation des bâtiments : par exemple, une couche de laine de verre, associée en série avec le mur, aboutit à une résistance équivalente soumise à  $\Delta T =$  température extérieure – température intérieure. On peut alors placer une résistance parallèle pour modéliser les fenêtres etc.

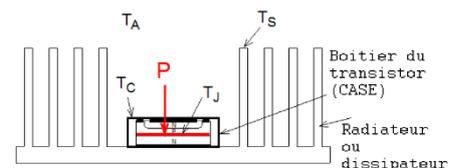
Nous allons dans ces pages, illustrer la loi d'ohm thermique au travers un cas usuel pour les électroniciens : le transfert de puissance entre un semi-conducteur et l'air ambiant.

Prenons l'exemple d'un transistor de puissance fixé sur un dissipateur. La jonction doit dissiper la puissance générée par la puce. On favorise cette évacuation de chaleur en fixant le boîtier sur un dissipateur. On note :

A : ambiante, C : case, J : jonction, S : surface (ou Sink, pour dissipateur).



Transistor seul



Transistor monté sur son dissipateur

Le chemin entre la jonction et l'air ambiant montre 3 résistances en série

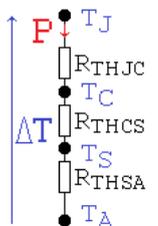
La loi d'ohm en est :  $\Delta T = R_{TH} P$ , où  $R_{TH} = R_{THJC} + R_{THCS} + R_{THSA}$  et  $\Delta T = T_J - T_A$ .

Généralement les températures sont imposées :

$T_J$  a une valeur maximale imposée par le constructeur du transistor, par exemple  $150^\circ\text{C}$ ,

$T_A$  est donné par l'environnement, par exemple  $25^\circ\text{C}$ , en présence d'un air soufflé.

$P$  est déterminée par le cahier des charges du montage électronique qui donne la puissance dans le transistor (à une équation du type  $V_{CE} \times I_C$  par exemple).



Le seul paramètre modifiable est alors  $R_{TH}$ , avec comme objectif de ne pas dépasser  $T_{Jmax}$  sous peine de destruction du transistor. Choisissons l'application numérique :  $P = 20 \text{ W}$ .

Il vient :  $\Delta T_{max} = T_{Jmax} - T_A = 150 - 25 = 125^\circ\text{C}$ . Il faut donc :  $R_{TH} P < 125$ , soit  $R_{TH} < 6,25^\circ\text{/W}$ .

Le transistor est donné avec  $R_{THJC} = 1,67^\circ\text{/W}$  (valeur indiquée dans la datasheet)

Prenons un dissipateur fixé de telle façon que  $R_{THCS} = 1^\circ\text{/W}$  (fonction du serrage, de l'état de surface).

Il faudra choisir un dissipateur à  $R_{THSA} \leq 3,58^\circ\text{/W}$ . Cela donne le modèle (forme, surface d'échange).

## 2) Equation complexe avec la capacité thermique

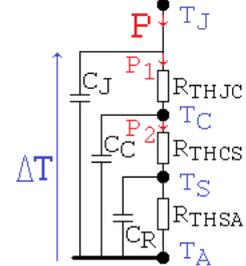
La relation précédente est statique. Pour représenter l'évolution de la température en fonction du temps, il faut ajouter la notion de capacité thermique. Un condensateur est le composant qui « maintient » la température, comme en électricité, qui « maintient » la tension. En thermique, l'unité est le J/°C.

La capacité thermique est liée à la masse et à la matière du matériau.

La jonction, en silicium, a une certaine masse. Elle dispose donc d'une capacité thermique, que l'on nomme  $C_J$ . De même pour le boîtier du transistor. Le dissipateur, massique, en aluminium, a une capacité thermique élevée.

Prenons  $T_A$  la température de référence : c'est donc notre origine.

Nous pouvons placer les 3 condensateurs entre les différentes températures et la température de référence. Il vient des branches parallèles qui dévient la « circulation » de la puissance. Le schéma équivalent en est :



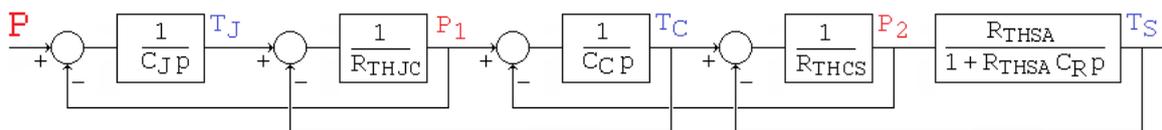
On peut chercher à résoudre ce système par le formalisme des schémas blocs.

Pour ce faire, on écrit les équations sous forme de Laplace :

$$T_J = (P - P_1) / C_J p \quad P_1 = (T_J - T_C) / R_{THJC} \quad T_C = (P_1 - P_2) / C_C p \quad P_2 = (T_C - T_S) / R_{THCS}$$

$$T_S = Z_R P_2, \quad \text{avec } Z_R = R_{THSA} / (1 + R_{THSA} C_R p)$$

Le schéma fonctionnel résultant est :



A ce niveau d'imbrications et d'équations, la résolution n'est pas possible « à la main ». Une solution serait d'exploiter des logiciels orientés automatique, comme par exemple, Simulink. On peut ainsi voir l'évolution des températures (par rapport à  $T_A$ ) lors d'une entrée  $P = \text{constant}$ .

Mais profitons de l'analogie avec un réseau électrique pour exploiter Pspice.

## 3) Résolution avec Pspice

Prenons les valeurs suivantes :

$$C_J = 1,5 \text{ J/}^\circ\text{C}$$

$$C_C = 12 \text{ J/}^\circ\text{C}$$

$$C_R = 60 \text{ J/}^\circ\text{C}$$

On conserve :  $P = 20 \text{ W}$

$$R_{THJC} = 1,67 \text{ }^\circ\text{/W}$$

$$R_{THCS} = 1 \text{ }^\circ\text{/W}$$

$$R_{THSA} = 3,58 \text{ }^\circ\text{/W.}$$

loi d'ohm thermique sur dissipateur

\* schéma analogue

\* fichier radiateur.cir

\* circuit :

RJC TJ TC 1.67

RCS TC TS 1

RSA TS TA 3.58

CJ TJ TA 1.5

CC TC TA 12

CR TS TA 60

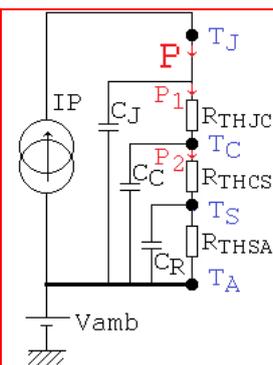
IP TA TJ PULSE (0 20 500 1 1 2000 4000)

Vamb TA 0 DC 25 ; T ambiante

.TRAN 1s 4000s

.PROBE

.END



*Netlist, prête à simuler*

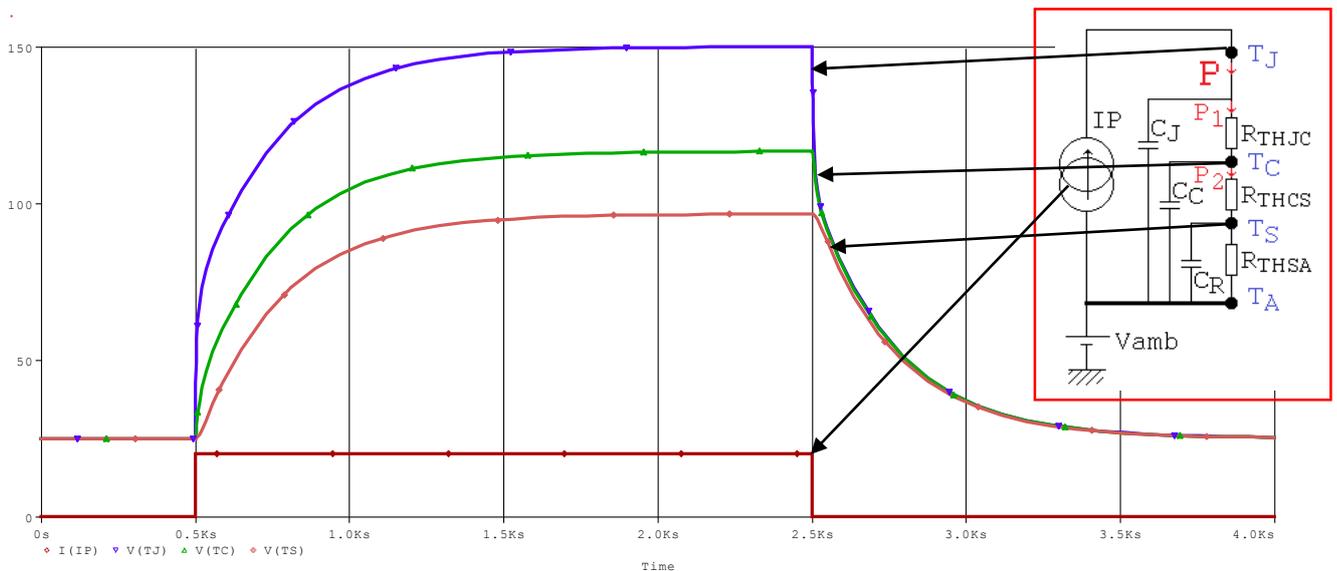
### Commentaires :

Les valeurs numériques semblent fantaisistes en électricité, mais cela modélise un circuit thermique.

La température ambiante est 25° au-dessus de 0°. Cela se traduit par une tension continue de 25 V.

On place un échelon de puissance 20 W. Mais l'analogie de la puissance est le courant. Donc un échelon de 20 A est placé par la source pulse. Les durées doivent être à l'échelle des phénomènes à observer : ici des durées de milliers de secondes sont cohérentes.

Des condensateurs de 1,5, 12, 60 F représentent les capacités thermiques.



### Interprétation :

Pour faciliter la lecture, l'échelon est placé à  $t = 500$  s. Cela permet de mieux voir que toutes les températures démarrent de la température ambiante, ce qui montre l'équilibre thermique.

La **puissance** à dissiper est installée instantanément (on peut imaginer que le transistor était bloqué, et qu'on présente courant et tension). L'échelon de puissance va de 0 W à 20 W. D'où la source **20 A**. On visualise l'évolution de la température. Les 3 courbes sont à la même échelle.

### Jonction :

On lit aisément la température finale de jonction de  $150^{\circ}\text{C}$  (150 V). On retrouve le calcul fait en statique. Le temps de réponse à 5% est de 668 s (soit 11 minutes environ). Cela se lit lors du passage à  $(0,95 \times 125) + 25 = 143,75^{\circ}\text{C}$

### Boîtier :

La température finale est de  $116,6^{\circ}\text{C}$ .

Cela se calcule aisément par le pont diviseur statique :  $25^{\circ} + 20 \times (3,58 + 1) = 25 + 91,6 = 116,6^{\circ}$ .

### Surface du dissipateur :

Le pont diviseur statique donne la température finale :

$25^{\circ} + 20 \times 3,58 = 25 + 71,6 = 96,6^{\circ}$ . C'est retrouvé par la simulation. En clair, on se brûle les doigts !

On peut également déduire un temps de réponse à 5% :

temps pour franchir  $(0,95 \times 71,6) + 25 = 93,02^{\circ}\text{C}$  : 814 s (soit 13,5 mn environ)

Le circuit est du 3<sup>ème</sup> ordre. Néanmoins, c'est la cellule  $R_{THSA} C_R$  qui domine, dont la constante de temps associée est  $60 \times 3,58 = 214,8$  s.

On a visualisé également le refroidissement naturel (à  $t = 2500$  s) : on revient à la température ambiante avec les mêmes temps de réponse.

### Conclusion

Pspice permet de vérifier le comportement thermique de cette installation. On peut faire d'autres runs, comme analyser l'élévation de température suite à un pic de puissance.

Le modèle thermique du dissipateur est ici simple. Une piste pour pousser la modélisation : travailler ailette par ailette, en tenant compte d'un gradient de température.

Remarquons pour finir que nous n'avons pas fait une « vraie » étude thermique. En effet, on n'a pas tenu compte du mouvement de l'air au sein des ailettes, du rayonnement...

articles 1 à 43 : sur le livre

**Tableau récapitulatif des articles PDF disponibles sur ce site**

n°	titre	lien présentation	lien direct article
	Guide d'installation et d'emploi simplifié	<a href="#">présentation</a>	<a href="#">document PDF</a>
44	Exemples basiques et des exercices...	<a href="#">présentation</a>	<a href="#">document PDF</a>
45	Un exemple de circuit passif	<a href="#">présentation</a>	<a href="#">document PDF</a>
46	Un oscillateur Colpitts	<a href="#">présentation</a>	<a href="#">document PDF</a>
47	Compensation en fréquence des amplificateurs opérationnels	<a href="#">présentation</a>	<a href="#">document PDF</a>
48	Un amplificateur à transistors bipolaires	<a href="#">présentation</a>	<a href="#">document PDF</a>
49	Une bascule D Flip Flop CMOS	<a href="#">présentation</a>	<a href="#">document PDF</a>
50	Une porte XOR à transistors MOS	<a href="#">présentation</a>	<a href="#">document PDF</a>
51	Un VCO à 12 transistors MOS	<a href="#">présentation</a>	<a href="#">document PDF</a>
52	Une PLL à moins de 20 transistors MOS	<a href="#">présentation</a>	<a href="#">document PDF</a>
53	Un oscillateur à résistance négative	<a href="#">présentation</a>	<a href="#">document PDF</a>
54	Une charge électronique	<a href="#">présentation</a>	<a href="#">document PDF</a>
55	Un amplificateur en classe C	<a href="#">présentation</a>	<a href="#">document PDF</a>
56	Le monostable 74 123	<a href="#">présentation</a>	<a href="#">document PDF</a>
57	Un amplificateur en classe D	<a href="#">présentation</a>	<a href="#">document PDF</a>
58	Le transformateur en linéaire	<a href="#">présentation</a>	<a href="#">document PDF</a>
59	La loi d'ohm thermique	<a href="#">présentation</a>	<a href="#">document PDF</a>
60	Le transformateur en non linéaire	<a href="#">présentation</a>	<a href="#">document PDF</a>
61	Robustesse d'un oscillateur en anneau	<a href="#">présentation</a>	<a href="#">document PDF</a>
62	Une alimentation stabilisée	<a href="#">présentation</a>	<a href="#">document PDF</a>
63	Modélisation d'un haut-parleur	<a href="#">présentation</a>	<a href="#">document PDF</a>
64	Un synthétiseur de fréquence	<a href="#">présentation</a>	<a href="#">document PDF</a>
65	Un ampli audio de Sparkfun	<a href="#">présentation</a>	<a href="#">document PDF</a>
66	Simulation logique et analogique	<a href="#">présentation</a>	<a href="#">document PDF</a>
67	Un oscillateur à relaxation	<a href="#">présentation</a>	<a href="#">document PDF</a>
68	Lecteur de TAG RFID 125 kHz	<a href="#">présentation</a>	<a href="#">document PDF</a>
69	Diagramme de l'œil avec Pspice	<a href="#">présentation</a>	<a href="#">document PDF</a>
70	Un amplificateur hautes fréquences	<a href="#">présentation</a>	<a href="#">document PDF</a>
71	Une bizarrerie enfin expliquée...	<a href="#">présentation</a>	<a href="#">document PDF</a>
72	Comprendre le paramétrage de la FFT	<a href="#">présentation</a>	<a href="#">document PDF</a>
73	La relation de Bennett	<a href="#">présentation</a>	<a href="#">document PDF</a>
74	Simuler un circuit à plus de 20 transistors avec PSpice Eval	<a href="#">présentation</a>	<a href="#">document PDF</a>
75	Une horloge biphasé sans recouvrement	<a href="#">présentation</a>	<a href="#">document PDF</a>
76	Quelques simulations sur la diode	<a href="#">présentation</a>	<a href="#">document PDF</a>
77	Un ampli classe A, avec transformateur de sortie	<a href="#">présentation</a>	<a href="#">document PDF</a>
78	Des stimuli pour PSpice	<a href="#">présentation</a>	<a href="#">document PDF</a>
79	Simuler le TL431 : zener ajustable	<a href="#">présentation</a>	<a href="#">document PDF</a>
80	Un ADC flash	<a href="#">présentation</a>	<a href="#">document PDF</a>
81	Une chaîne d'acquisition : S&H, ADC, DAC	<a href="#">présentation</a>	<a href="#">document PDF</a>
82	Un amplificateur 50 MHz	<a href="#">présentation</a>	<a href="#">document PDF</a>
83	Un dérivateur non inverseur	<a href="#">présentation</a>	<a href="#">document PDF</a>
84	Un amplificateur bipolaire avec push pull CMOS	<a href="#">présentation</a>	<a href="#">document PDF</a>
85	Rôle des répéteurs logiques dans un circuit intégré	<a href="#">présentation</a>	<a href="#">document PDF</a>
86	Un driver logique CMOS pour charge 50 ohms	<a href="#">présentation</a>	<a href="#">document PDF</a>
87	Des triggers de Schmitt et des applications	<a href="#">présentation</a>	<a href="#">document PDF</a>
88	Un filtre gaussien analogique	<a href="#">présentation</a>	<a href="#">document PDF</a>
89	Un générateur de bruit rose	<a href="#">présentation</a>	<a href="#">document PDF</a>

90	Un anémomètre à fil chaud : simulation comportementale	<a href="#">présentation</a>	<a href="#">document PDF</a>
91	Un oscillateur à pont de Wien stabilisé par CTN	<a href="#">présentation</a>	<a href="#">document PDF</a>
92	L'emballement thermique d'une diode	<a href="#">présentation</a>	<a href="#">document PDF</a>
93	Les puissances dans un amplificateur	<a href="#">présentation</a>	<a href="#">document PDF</a>
94	Asservissement de puissance dans une résistance	<a href="#">présentation</a>	<a href="#">document PDF</a>
95	Asservissement de la puissance émise par une antenne radio	<a href="#">présentation</a>	<a href="#">document PDF</a>
96	Un driver de LED de puissance	<a href="#">présentation</a>	<a href="#">document PDF</a>
97	Exploiter Pspice pour simuler des filtres numériques	<a href="#">présentation</a>	<a href="#">document PDF</a>
98	Un filtre en cosinus surélevé avec Pspice	<a href="#">présentation</a>	<a href="#">document PDF</a>
99	Effet de la température sur un amplificateur en classe A	<a href="#">présentation</a>	<a href="#">document PDF</a>
100	Un amplificateur à transistors JFET et bipolaires	<a href="#">présentation</a>	<a href="#">document PDF</a>
<b>Supplément, hors article :</b>			
<b>mon cours « Electronique pour les communications numériques », <a href="#">polycopié couleur 201 pages en pdf</a></b>			

[retour à l'écran d'accueil de ce site](#)