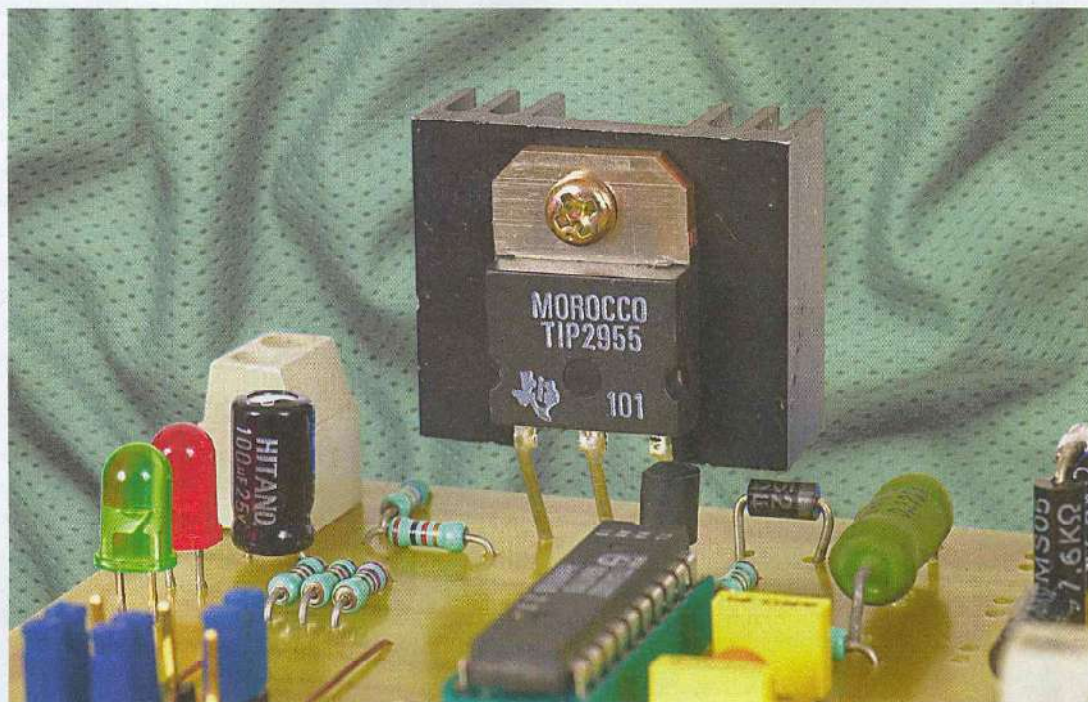


Le calcul des dissipateurs thermiques



Les dissipateurs thermiques sont incontournables en électronique car il est souvent nécessaire de refroidir les transistors et autres composants de puissance. En effet, tout dispositif traversé par un courant électrique subissant l'effet joule perd une partie de la puissance qui lui est transmise sous forme de chaleur.

Dès lors que la puissance perdue devient importante ou bien si les conditions d'évacuation de la chaleur sont insuffisantes, il faut faire appel à un dissipateur thermique. Cet article vous aidera à dimensionner correctement les dissipateurs dont vous avez besoin dans vos applications personnelles.

Les problèmes

Différents effets de la chaleur sont redoutés dans les systèmes électroniques. Généralement, le point principal que l'on regarde en premier concerne la température de jonction. En effet, pour la plupart des composants classiques, la température de jonction des semi-conducteurs doit être maintenue en deçà de 150 °C (175 °C pour certains composants

récents). Au-delà de cette température, la colle qui reporte les puces sur le fond des boîtiers n'assure plus correctement le maintien. Cela provoque rapidement une forte dégradation des conditions d'évacuation de la chaleur et entraîne généralement un emballement thermique (si la puissance à dissiper reste constante). Ensuite, au-delà de la déformation du boîtier, les propriétés du silicium commencent à être altérées vers 190 °C. Il est donc vital de limiter la température de jonction des composants aux valeurs spécifiées par les constructeurs si l'on veut garantir une durée de vie satisfaisante au système électronique que l'on étudie.

Mais il n'y a pas que la température de jonction qu'il faut surveiller dans un système électronique. En effet, les composants sont assemblés sur un circuit imprimé qui ne supporte pas

des températures aussi élevées. Par exemple, sur un substrat classique tel que l'époxy 16/10^e, on considère que la température maximale de fonctionnement se situe aux alentours de 125 °C. Au-delà, la dilatation du PCB devient telle que les joints de soudure sont sollicités anormalement ce qui finit toujours par provoquer une forte dégradation du contact (ce qui entraîne à son tour un échauffement plus élevé de la soudure, etc.). Il existe également de nombreux composants électroniques qui n'apprécient guère les températures élevées. Citons par exemple les condensateurs chimiques qui finissent par « sécher », les diodes leds et les optocoupleurs qui sont très sensibles au phénomène de dilatation, etc. N'oublions pas non plus de citer les problèmes de manipulation qui peuvent être difficiles à résoudre si l'on veut éviter aux utilisateurs de se

brûler avec un système électronique qui dissipe beaucoup de puissance.

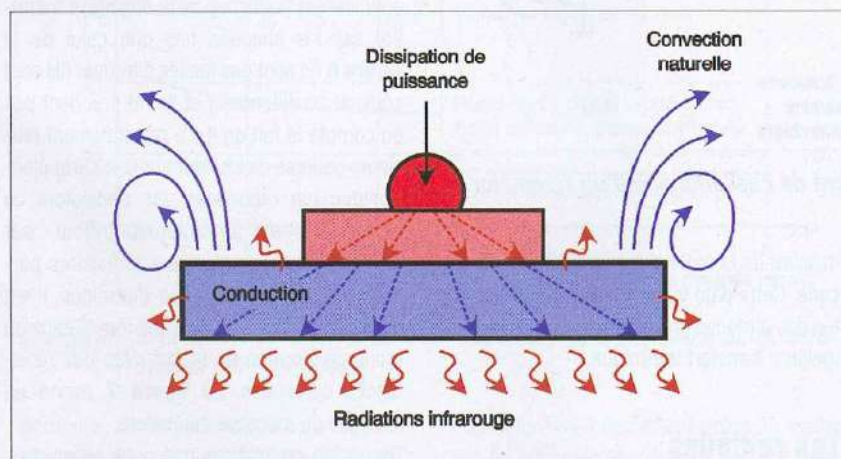
Bref, comme vous l'aurez compris, la prise en compte des phénomènes thermiques en électronique est un point important. Les lois de la thermodynamique sont loin d'être simples à utiliser pour le commun des mortels. La modélisation en éléments finis des dispositifs électroniques à étudier n'est pas une sinécure non plus ! Fort heureusement pour l'amateur, dans la plupart des cas il est possible de se contenter d'une modélisation très simple qui ne met en œuvre que des formules simples que nous allons décrire un peu plus loin.

Comme nous l'avons mentionné dans l'introduction, pour les systèmes électroniques, la chaleur est directement issue des pertes par effet joule. Plus la puissance dissipée est élevée, plus la température du composant incriminé est élevée. En vertu du principe de diffusion, la chaleur produite localement par un point chaud cherche à se répartir aux alentours du point en question pour tendre finalement vers une température uniforme de l'univers. À une échelle plus modeste, on constate que la chaleur cherche à se répartir au travers de trois phénomènes principaux : La conduction, la convection et la radiation (voir la **figure 1**).

dient de température qui s'établit dans les éléments traversés dépend de la nature des matériaux employés et de leurs dimensions géométriques.

Lorsque l'on examine le chemin que peut suivre la chaleur, on constate que des fluides (généralement de l'air ou de l'eau) sont également en contact avec les éléments au travers desquels la chaleur s'écoule par conduction. Il en résulte bien entendu un échange avec le milieu extérieur. Si le gradient de température entre les éléments qui chauffent et le milieu ambiant est suffisant, on voit apparaître une circulation du fluide qui va accélérer les échanges thermiques. On appelle ce phénomène la convection. On parle de convection naturelle lorsque le mouvement des fluides est naturel, sinon on parle de convection forcée (par exemple, si l'on ajoute un ventilateur dans le système). Selon la nature des matériaux qui sont en contacts, la chaleur emprunte plus volontiers la conduction ou la convection pour se diffuser. Cependant les deux phénomènes cohabitent en permanence. Nous verrons plus loin qu'en première approche, il n'est pas nécessaire de les distinguer pour dimensionner les dissipateurs employés en électronique.

Enfin, pour en terminer avec la description



1 La conduction, la convection et la radiation

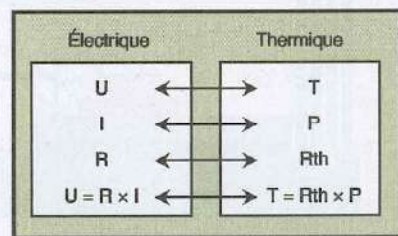
Les principes généraux

La conduction, comme son nom l'indique, permet à la chaleur de se propager dans la masse des matériaux qui sont en contacts. Le flux de chaleur se déplace de proche en proche, empruntant majoritairement le chemin de moindre résistance (tout comme le fait également le courant électrique). Le gra-

des phénomènes mis en jeu, vous savez sûrement que tout corps chaud émet des radiations infrarouges. Une part de l'énergie est donc véhiculée par les radiations. À l'échelle des systèmes électroniques, ces radiations représentent une faible part de l'énergie dissipée. C'est pour cela qu'elle est souvent négligée (ou assimilée par la dimension des autres phénomènes).

En pratique

Abordons maintenant le côté concret des choses pour un électronicien. En première approximation, on constate que tout point chaud est une source d'énergie et la chaleur qu'elle produit s'écoule dans les matériaux avec lesquels il est en contact, la chaleur choisissant majoritairement le chemin de moindre résistance. L'analogie avec la circulation d'un courant électrique est alors facile à faire. De plus, il faut noter qu'il a été constaté expérimentalement que la différence de température qui s'établit entre les pièces en contact (le gradient de température) est proportionnelle à la puissance à dissiper. Dès lors, il a été assez facile de définir par analogie ce que l'on appelle la résistance thermique (voir la **figure 2**).



2 Analogie entre les lois électriques et les lois thermiques

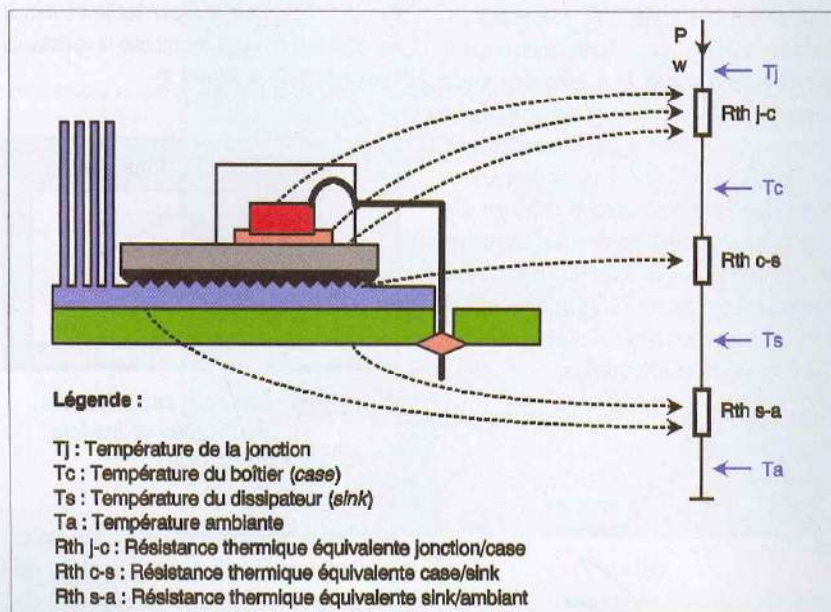
Tant que les phénomènes mis en jeu restent linéaires l'analogie est possible et les formules mathématiques qui en découlent sont tout aussi simples que la fameuse loi d'Ohm. La **figure 2** illustre la traduction mathématique de cette analogie : la formule $U = R \times I$ devient $T = R_{th} \times P$. Au même titre que U est la différence de tension qui apparaît aux bornes d'une résistance R , T est la différence de température qui se développe aux bornes des éléments mécaniques symbolisés par la résistance thermique R_{th} . De même que la différence de tension est proportionnelle au courant qui traverse la résistance, la différence de température est proportionnelle à la puissance qui circule dans l'élément caractérisé par R_{th} .

Il n'est donc pas nécessaire de formuler indépendamment une loi pour décrire le phénomène de la convection, une loi pour le phénomène de la conduction et une loi pour le phénomène de la radiation. La résistance thermique regroupe en un seul terme les trois phénomènes dont nous avons parlé, ce qui est bien pratique pour la suite des calculs qui

nous intéressent. À partir du moment où l'on est à l'aise avec la loi d'Ohm, il est facile par analogie d'étudier le dimensionnement d'un dissipateur thermique dans les situations les plus courantes. En effet, de même qu'il est possible de modéliser par différentes résistances le chemin parcouru par un courant (résistance des fils, résistance de contact, résistances équivalentes aux différents dispositifs électroniques), il est également possible de décomposer la résistance thermique d'un assemblage mécanique en différentes résistances élémentaires. La **figure 3** reproduit le modèle le plus utilisé pour étudier l'assemblage d'un transistor de puissance sur un dissipateur thermique.

remment plus favorables (on constate tout de même 10 % à 20 % de gain selon les cas). Notez que pour les éléments mécaniques qui ne sont pas soudés entre eux, il faut faire apparaître une résistance qui représente le contact des surfaces qui sont mises en contraintes. En effet, les surfaces en question ne sont jamais parfaitement planes et l'état de surface des éléments en question détermine grandement la résistance thermique du contact. Lorsque la puissance à dissiper est importante, cette résistance supplémentaire freine la conduction de la chaleur et introduit un fort gradient de température qui peut être préjudiciable au système. On peut diminuer grandement cette résistance de contact en

un profilé d'aluminium très performant par plusieurs transistors de puissance. Lorsque les performances attendues ne sont pas trop élevées, on peut décider de réaliser soi-même le dissipateur à l'aide d'une simple tôle d'aluminium ou de cuivre, montée verticalement pour profiter au mieux de la convection naturelle. Dans ce cas, l'abaque de la **figure 5** pourra vous permettre de déterminer empiriquement les dimensions de la tôle nécessaire pour votre application. Notez dans ce cas qu'il vaudra mieux prendre des marges de fonctionnement plus importantes que d'habitude. Par exemple, dans vos calculs prenez environ 120 °C comme limite pour la température de jonction de vos transistors. Vous aurez ainsi une marge de 30 °C pour couvrir vos incertitudes de calculs et de réalisation, ce qui est suffisant lorsque la puissance mise en jeu reste inférieure à 10 W environ (ce qui revient à dire que l'erreur sur la résistance thermique globale doit rester inférieure à 3 °C/W).



3 Le modèle thermique équivalent de l'assemblage d'un transistor

Lorsque la puissance à dissiper est modeste, il est généralement possible de trouver le dissipateur adapté à vos besoins sur catalogue. C'est d'ailleurs le choix le plus sûr car les caractéristiques annoncées sont généralement correctes. Dans le cas contraire, vous devrez utiliser du profilé d'aluminium dont la résistance thermique se calcule en fonction de la longueur utilisée à l'aide d'un abaque fourni par le fabricant. Ce type de profilé est généralement vendu au mètre ce qui revient assez cher si l'on a besoin de seulement 10 cm. Mais c'est en général la seule solution lorsque l'on vise une résistance thermique inférieure à 2 °C/W. Les dissipateurs du commerce sont généralement peints en noir. Cela permet tout simplement d'optimiser le rayonnement des infrarouges par le dissipateur, ce qui permet d'obtenir des performances légè-

re utilisant de la patte thermique à base de silicone. Cette pâte vient combler les irrégularités des surfaces en contact et assure un bien meilleur transfert thermique.

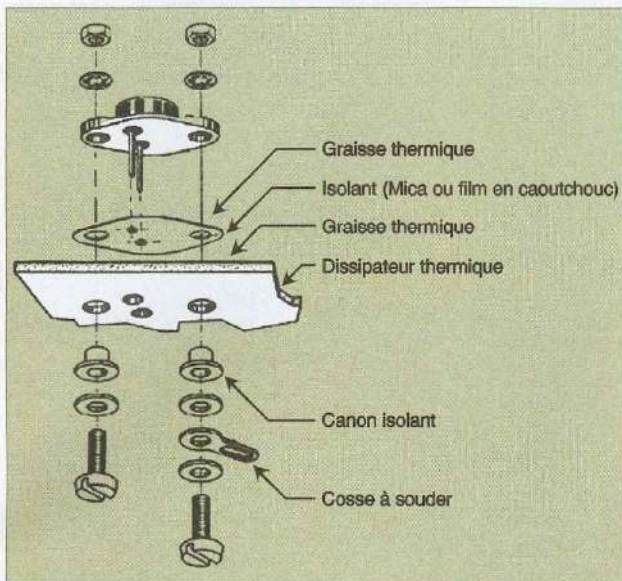
Les remèdes

Si vous réalisez régulièrement les montages qui sont proposés dans ces pages, vous aurez sûrement remarqué qu'il faut parfois intercaler des feuilles isolantes (mica ou caoutchouc) entre les transistors de puissance et le dissipateur (voir la **figure 4**). Cet isolement introduit également une résistance thermique supplémentaire qui s'oppose à la circulation de la chaleur. Il ne faut donc utiliser cette solution que lorsque cela est indispensable, comme par exemple pour partager

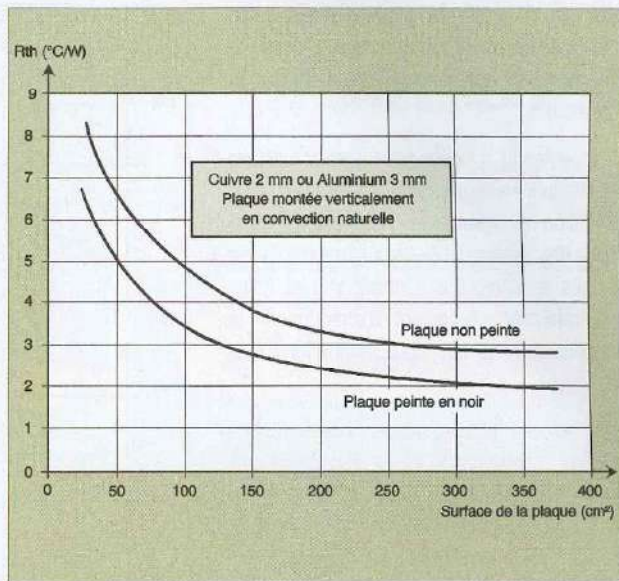
Les astuces

Enfin, notez que lorsque la puissance à dissiper est faible (moins de 500 mW), il est possible d'utiliser le cuivre d'un circuit imprimé en guise de dissipateur. Cependant, cette solution est beaucoup plus difficile à maîtriser car les abaques tels que celui de la **figure 6** ne sont pas faciles à trouver (ils sont souvent confidentiels) et ils ne prennent pas en compte le fait qu'il y a généralement plusieurs sources de chaleur sur une carte électronique (un régulateur, des transistors de puissances et un microcontrôleur par exemple). Lorsque plusieurs transistors partagent le même dissipateur thermique, il est possible de faire un schéma équivalent au montage, comme on le fait avec des résistances classiques. La **figure 7** donne un exemple de montage équivalent.

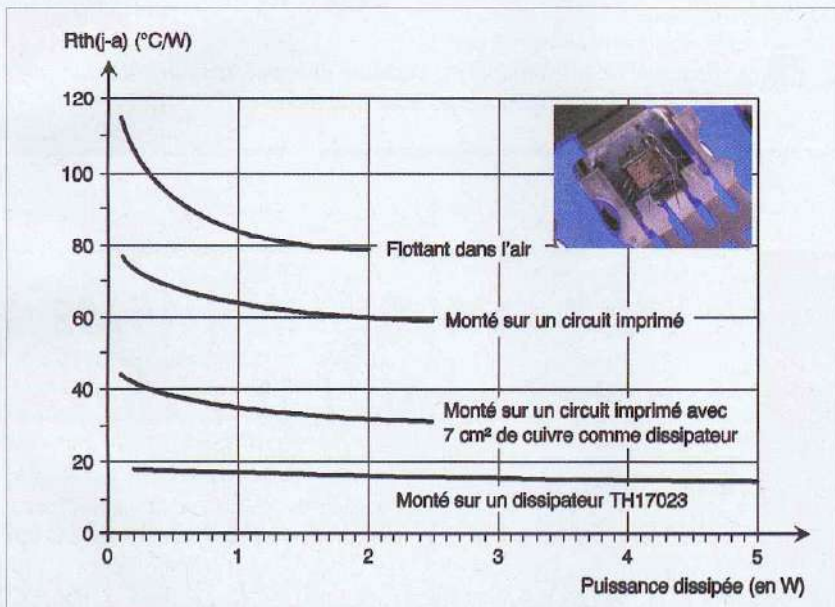
Toutes les explications que nous avons données jusqu'à présent prenaient en compte la dissipation d'une puissance constante. Très souvent, la puissance dissipée par les transistors varie avec une dynamique assez rapide et l'estimation de la température de jonction à l'aide d'une puissance moyenne peut s'avérer trop contraignante et conduire à surdimensionner largement le système. Une fois de plus, l'analogie avec les phénomènes électriques vient à notre secours. En effet, l'inertie de la matière face à un flux de chaleur peut être représentée par une capacité



4 Exemple du montage d'un transistor TO3 sur un dissipateur thermique



5 Résistance thermique d'une plaque de cuivre ou d'aluminium

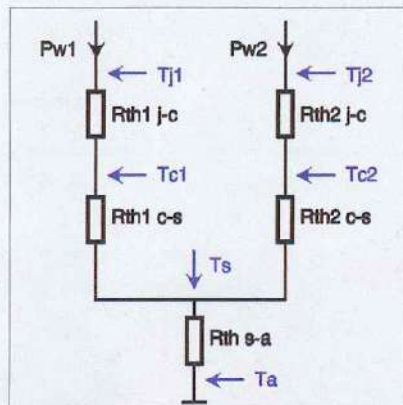


6 La résistance thermique d'un transistor TO220 installé dans différentes configurations

thermique. De la même façon qu'un condensateur emmagasine du courant, la matière emmagasine de la chaleur. L'analogie est donc facile à faire et il suffit d'ajouter la capacité thermique des différents éléments en parallèle avec leur résistance thermique pour que le schéma équivalent puisse être utilisé afin de prendre en compte des profils très variés de la puissance dissipée (voir la figure 8).

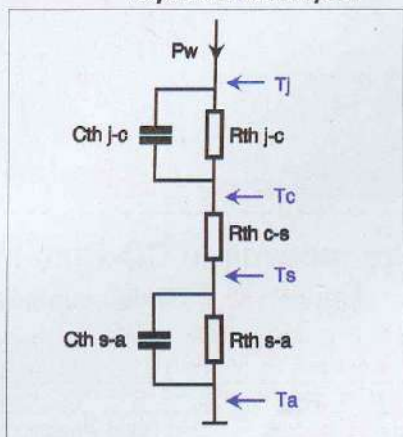
Étant donné que nous sommes en présence d'un système qui reste linéaire (tant que la puissance dissipée est raisonnable), la réponse impulsionnelle d'un tel système peut

être déterminée facilement grâce au théorème de superposition (tout comme on le fait dans le domaine électrique). Il suffit de décomposer la puissance en échelons élémentaires et de calculer la réponse du système à chacun de ces échelons. Ensuite, il ne reste plus qu'à faire la somme de toutes les réponses pour déterminer la réponse globale du système, comme le montre la figure 9. Cependant, la difficulté principale consiste à estimer correctement la capacité thermique du système et il n'y a généralement pas d'autre choix que de l'estimer expérimentalement à l'aide de quelques mesures (par



7 Schéma équivalent du montage de deux transistors sur un seul dissipateur thermique

8 Schéma équivalent avec la prise en compte des capacités thermiques

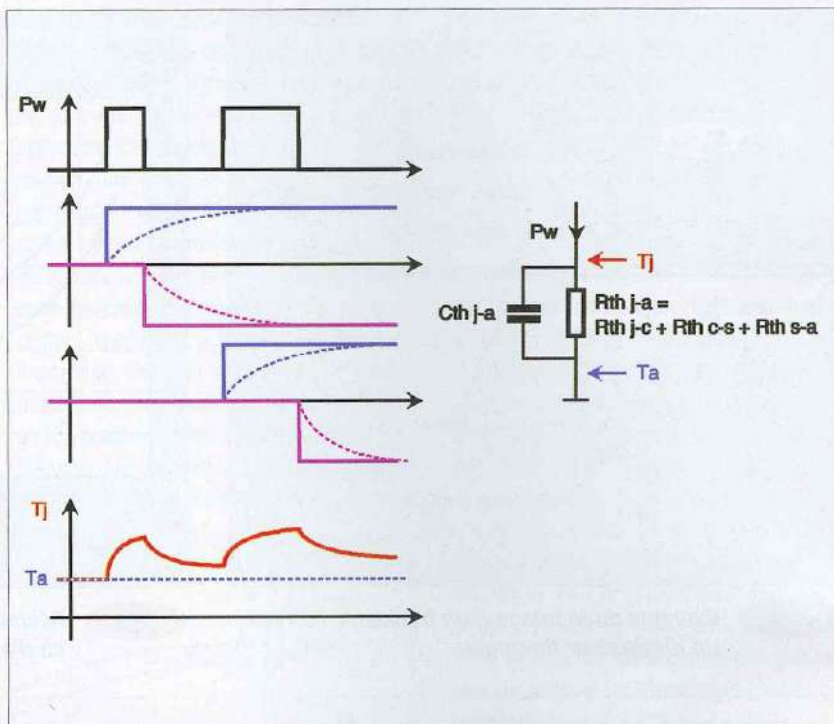


exemple, en mesurant la température à l'aide d'un thermocouple pendant que le système est soumis à un échelon élémentaire bien maîtrisé).

Bien entendu, il existe de nombreux logiciels professionnels qui savent déterminer avec précision les paramètres thermiques équivalents des systèmes électroniques, mais les choses se compliquent assez vite et il est généralement nécessaire d'abandonner le modèle simplifié que nous vous avons présenté ici.

Dans ce cas il est généralement préférable d'utiliser la simulation plutôt que les calculs pour étudier le comportement du système car les calculs deviennent vite très complexes. Si ce sujet vous intéresse, vous trouverez une note d'application très intéressante sur le site www.infineon.com (anciennement Siemens) en cherchant le document portant l'intitulé « Thermal Modeling of Power Electronic Systems » à l'aide du moteur de recherche du site.

P. MORIN



Réponse impulsionnelle du système complet (modèle ultra simplifié) à l'aide du théorème de superposition

CD-01
LED
Fichiers PDF - 145 pages

**TRIODES
TÉTRODES
PENTODES**

30 €

6L6 6550 845

2A3 845 7189/EL84

6V6 7189/EL84 300B

9 AMPLIFICATEURS
DE 9 Weff à 65 Weff

Et si vous réalisiez votre ampli à tubes...

Une sélection de 9 amplificateurs
de puissances 9 Weff à 65 Weff
à base des tubes
triodes, tétrodes ou pentodes

Des montages à la portée de tous
en suivant pas à pas nos explications

Je désire recevoir le CD-Rom (fichiers PDF) « Et si vous réalisiez votre ampli à tubes... »

France : 30 € Union européenne : 30 € + 2 € frais de port Autres pays : nous consulter

Nom : _____ Prénom : _____

N° : _____ Rue : _____

Code Postal : _____ Ville-Pays : _____

Ci-joint mon règlement par : chèque bancaire CCP mandat - Union européenne : règlement uniquement par mandat postal
A retourner accompagné de votre règlement à : EDITIONS PÉRIODES 2-12 rue de Bellevue 75019 Paris Tél. : 01 44 84 88 28