

# routage des circuits imprimés et sécurité

Conseils pour une conception sûre et fiable de vos cartes électroniques



Figure 1. Vue de dessous du câblage volant d'un amplificateur utilisant des tubes KT-88, appartenant à l'auteur. La disposition des composants est claire, et la dissipation thermique correcte. La zone où un isolement électrique renforcé est nécessaire se reconnaît par la présence d'une feuille d'époxy noir. Le montage des composants volumineux, tels que les condensateurs électrolytiques, nécessite des fixations individuelles (supports métalliques). À certains emplacements, les composants sont disposés en couches superposées, ce qui peut compliquer les opérations de maintenance.

Roberto Armani (Elektor) et Marco Castiglioni (Italie)

Comparées au câblage traditionnel, les circuits imprimés (ou PCB de l'anglais Printed Circuit Board) permettent de concevoir ses projets d'une façon professionnelle, rationnelle et compacte. Cependant, pour assurer un fonctionnement fiable, quelques considérations physiques de base sont à prendre en compte lorsque des tensions élevées sont présentes, et/ou certaines pistes du circuit imprimé sont parcourues par des courants élevés. Dans cet article, nous allons passer en revue ce qu'il faut faire, mais plus important, ce qu'il ne faut pas faire !

Les cartes à circuit imprimé (PCB) ont sans nul doute révolutionné la façon dont les circuits sont fabriqués. Les exemples les plus anciens de la mise en œuvre des PCB remontent à 1948, et depuis, la technique de leur réalisation a fait de grands progrès. Si vous êtes particulièrement intéressé par l'évolution de la technologie des circuits imprimés, vous pouvez vous rendre ici [1].

Avant l'avènement des circuits imprimés, le câblage des composants était réalisé par des fils volants reliant directement les composants, en profitant de la longueur de leurs broches ; voir la **figure 1**. L'air, comme on le sait, est un excellent isolant, tandis que la distance importante d'un composant à l'autre, favorisait l'écoulement de l'air assurant la dissipation calorifique. Tout était donc parfait ? Pas vraiment. Les circuits nécessitaient des châssis métalliques galvanisés, les appareils atteignaient

souvent un volume et un poids important, et la technique de construction entièrement manuelle coûtait une fortune. Mais cette solution demeurerait toujours viable car les appareils équipés de tubes électroniques étaient encore très volumineux et le problème de leur encombrement n'aurait pas pu être résolu par un circuit imprimé. Dans l'exemple de la figure 1, qui montre la vue de dessous d'un amplificateur équipé de tubes à vide KT-88, le câblage est assez clair, les composants dissipant de la chaleur étaient bien ventilés, reliés par des fils volants, l'isolation entre eux garantie, en dépit de la présence de haute tension (800 V CC) dans certaines parties du circuit. En plus de l'encombrement élevé, les faiblesses d'un tel procédé de câblage concernent principalement la maintenance, lorsque des composants étaient superposés et devaient parfois être retirés uniquement pour atteindre les composants à remplacer situés en dessous. Avec l'apparition des premiers semi-conducteurs de petites dimensions, les choses ont changé, et les premières cartes à circuit imprimé ont permis la réalisation d'appareils plus compacts et moins coûteux. Cette approche technologique a toutefois introduit quelques problèmes, à la tête desquels l'isolement, la dissipation calorifique, les capacités parasites et la diaphonie entre les pistes, ainsi que les interférences électromagnétiques (EMI). Dans cet article, nous allons nous concentrer principalement sur les aspects de la sécurité, i.e. l'isolement des hautes tensions et la dissipation calorifique en général.

## Matériaux

Le matériau utilisé comme support de circuits imprimés peut être rigide, flexible, ou un mélange des deux. Le choix dépend naturellement du type d'application, et de la température de fonctionnement du circuit. Le plus répandu actuellement est un mélange de fibre de verre et de résine appelé FR4 (Flame Resistant N°4), spécifié dans le standard IPC-4101E [2]. Selon les utilisations, d'autres types de matériau sont également utilisés comme l'indique le **tableau 1**.

## Isolement

Alors que les circuits imprimés ont permis de réduire l'encombrement, la diminution de l'espace entre les conducteurs ont rendu plus critiques les aspects relatifs à l'isolement, nécessitant plus de précautions lors de la conception du tracé d'un circuit. Il y a de nombreux paramètres à considérer lors du calcul de la distance minimum entre deux conducteurs (pistes dans ce cas) du circuit imprimé, pour en citer quelques-uns :

- La tension de fonctionnement
- Le type de matériau diélectrique du PCB
- Le nombre de couches
- La présence de conducteurs dans les couches internes (pour les circuits imprimés ayant 3 couches, ou davantage)
- La présence d'une couche de vernis protecteur

**Table 1: PCB Materials vs. Applications.**

*Dk (ou Er) = Constante Diélectrique Relative, propriété d'un matériau s'opposant à la transmission d'ondes électromagnétiques.*

*Tg = Température de transition du matériau, température à laquelle le matériau passe de l'état rigide à l'état déformable.*

Type de matériau	Dk (ou Er) à 1 MHz	Tg (°C)	Application
FR4	4.2...4.8	135...140	Standard
FR4	4.5...4.8	150...170	Standard/sans plomb
FR4	3.4...3.8 (@ 1 GHz)	180...220	Signaux rapides
PTFE	2.2...2.8	160	Radiofréquences
Polyamide	3.8...4.2	>=250	Hautes températures

### ➤ La pression atmosphérique

Toutefois, à la recherche des économies de temps et afin de consacrer la majeure partie de notre énergie à l'ensemble du procédé de conception, il peut être pratique d'utiliser des outils spécifiques, comme par exemple celui intégré dans le logiciel KiCad, dans d'autres logiciels de conception de PCB, ou pour une approche plus professionnelle, le produit *Saturn PCB Tool Design Kit*, mis à disposition gratuitement par Saturn PCB Design Inc. qui peut être téléchargé en [3].

Sur la **figure 2**, vous pouvez voir une copie d'écran de la fenêtre d'accueil du programme, montrant la multitude d'onglets disponibles. Pour évaluer les contraintes d'isolement, il est possible de se référer à la section *Minimum Conductor Spacing* (Espace minimum entre conducteurs), dans laquelle l'algorithme de calcul est basé sur les spécifications apportées par le Standard IPC-221B [4]. On peut commencer en choisissant une gamme de tension parmi celles de la table. Les valeurs indiquées

*Figure 2. Menu Minimum Conductor Spacing (espacement minimum entre conducteurs) du Toolkit Saturn. Selon la norme IPC-221B Standard, 2,5 mm pour une alimentation de 230 V CA et 1,25 mm pour une tension de 115 V CA.*

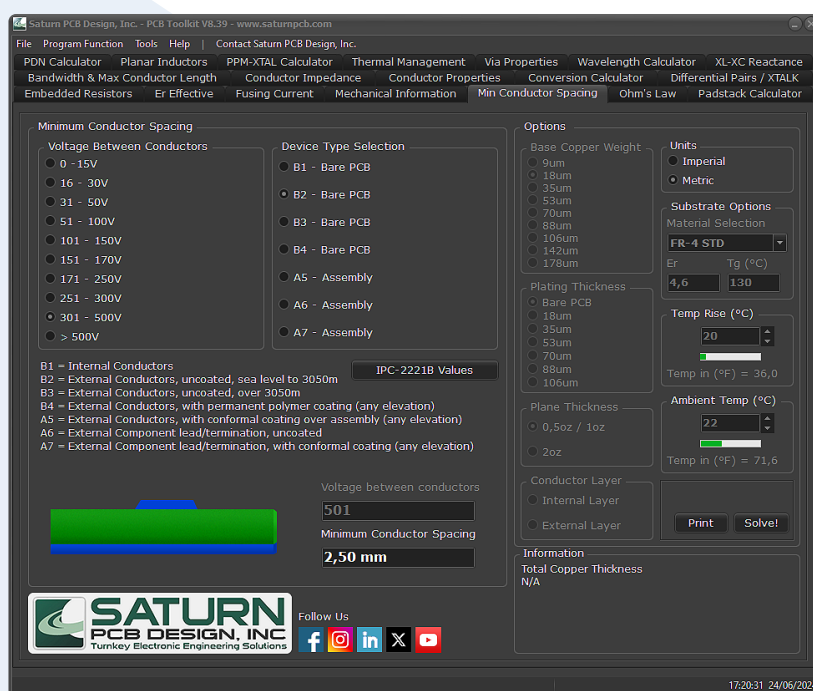




Figure 3. L'espacement minimum entre conducteurs est de 2,5 mm pour une tension d'alimentation de 230 V CA. Dans la configuration de cet exemple, il est toujours possible de l'appliquer si la tension d'alimentation est de 100 ou 115 V CA.

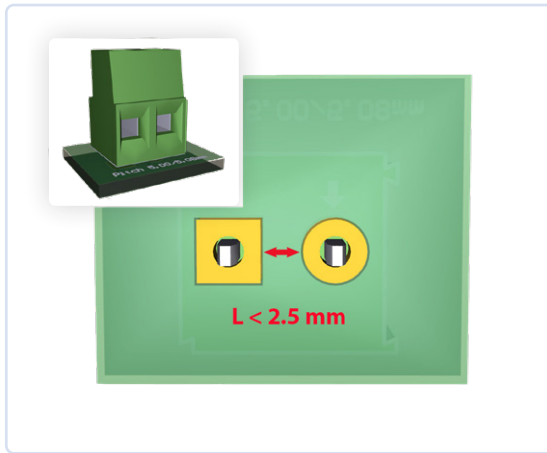


Figure 4. L'alésage entre les plots et les traces augmente fortement l'isolement d'un circuit imprimé, sur lequel ces découpes sont également utilisées pour séparer les zones ayant une différence de potentiels élevée.



Figure 5. En maintenant non connecté (flottant) le contact central, l'espacement d'isolement entre les pistes est doublé, l'utilisation d'une alimentation de 220 V devient une possibilité viable.

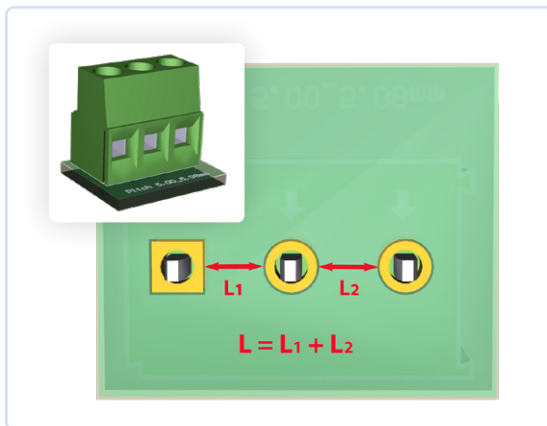
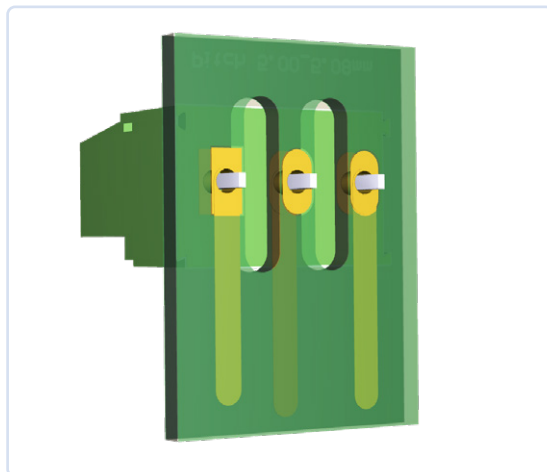


Figure 6. Exemple d'utilisation d'un connecteur à vis à trois plots, avec double découpe. Cette solution permet la connexion d'une alimentation au secteur 230 V CA Phase, Neutre et Terre (L, N et GND).



s'appliqueront directement aux tensions de crête CC et CA ; par exemple pour une tension d'alimentation de 230 V CA, la valeur à considérer sera de 325 V, et la gamme à choisir 301...500 V.

Dans le cas de tensions supérieures à 500 V, il est possible de choisir l'option >500 V et fixer directement **Voltage Between Conductors** (Tension entre les conducteurs) par la valeur préremplie. Après avoir entré la valeur, il faut cliquer sur le bouton **Solve** pour obtenir le résultat. Choisissez ensuite l'option B2, une des sept disponibles dans le menu **Device Type Selection** (choix du type de circuit), qui se réfère à un PCB non vernis, à une altitude standard. Une courte description de chaque choix possible est indiquée juste en dessous.

En choisissant les différentes options (pour une même tension), il est possible de vérifier immédiatement la distance minimum à respecter entre les conducteurs. Pour la tension d'alimentation de l'exemple précédent, le système indique une valeur de 2,5 mm.

**Note** : on peut observer que pour le fonctionnement à une altitude de plus de 3050 m, l'espacement augmente de façon significative, car la pression atmosphérique est de la plus haute importance pour limiter les phénomènes de génération d'arcs électriques. Si le circuit est prévu pour être utilisé en hautes altitudes, il est nécessaire de le protéger par une couche de vernis isolant, plutôt que de compter sur l'espacement entre les pistes.

## Gardons la distance !

Ayant déterminé la valeur de l'espacement minimum dans notre cas, voyons comment mettre cela en pratique sur le circuit imprimé, en utilisant des connecteurs pour déconnecter le câblage si nécessaire, excluant les cas de connexions directes (par soudage) des liaisons sur la carte.

Les **borniers à vis** sont la solution la plus répandue et économique pour cela. Ils existent en différents pas : 2,5/2,54 mm, 3,5/3,81 mm, 5,00/5,08 mm et 7,5/7,62 mm, pour ne citer que les principaux. Afin de maintenir un espacement de 2,5 mm entre les conducteurs, on peut éliminer les deux premiers cités, cependant le connecteur au pas de 5,00/5,08 mm (voir la **figure 3**) nécessite de prendre quelques précautions.

La distance  $L$  (inscrite en rouge) entre les deux broches inférieures est d'environ 2 mm, ce qui est inférieur à la limite requise. Cette taille de connecteur ne peut donc pas être utilisée pour une tension d'alimentation de 230 V CA, sauf en appliquant des considérations spéciales lors du routage du PCB.

En fait, si l'espace est limité, ce connecteur peut toujours être utilisé, à condition de modifier le diélectrique entre les contacts. Comment ? En le remplaçant par de l'air, comme sur la **figure 4**. En ce cas, la forme des plots a été modifiée, et un interstice de 2 mm a été fraisé entre eux. Cet interstice devra se prolonger jusqu'au point où les

pistes aboutiront — sur le routage du PCB — au moins en respectant le minimum requis.

Il s'agit d'un compromis qui devra être évité si l'espace disponible permet l'utilisation de connecteurs plus importants. Des perçages et découpes sont souvent utilisés pour augmenter l'isolement entre des zones à tensions élevées et celles à basse tension sur une carte PCB, y compris les plans de masse qui sont en général reliés au potentiel de la terre.

Une autre solution pratique (**figure 5**) consiste à utiliser trois plots de contacts sur un connecteur à vis de pas 5,00/5,08 mm, sans relier le connecteur central. Dans ce cas, la distance d'isolement  $L = L1 + L2$  autorise la connexion à la tension du secteur électrique, à condition que le plot central ne soit relié à aucune liaison ou piste du circuit imprimé et demeure flottant. À nouveau, cela doit être considéré comme un compromis de conception.

La **figure 6** montre une autre configuration utilisant un connecteur à vis à trois bornes, avec deux évidements fraisés entre les plots. Cette configuration permet la connexion de la phase, du neutre et de la terre, (L, N et GND) au secteur électrique standard de 230 V, tout en respectant les considérations établies dans les cas précédents.

Pour terminer, la **figure 7** montre une alternative sans compromis, utilisant un connecteur au pas de 7,00/7,62 mm. Son empreinte est d'environ 16 mm pour une configuration à deux broches, et 23 mm pour un connecteur à 3 broches. Ce n'est évidemment pas un connecteur miniature, mais certainement le plus sécurisé, parmi les plus sûrs en termes d'isolement et de capacité de charge. Son pas important autorise toute forme de routage et permet de relier le circuit à une tension d'alimentation supérieure à celle du secteur électrique.

**Les cosses Faston**, ou les cosses en fourche, sont très répandues. Elles permettent de nombreuses solutions intéressantes, faible coût, contacts fiables et résistance aux vibrations. Par contre, leur utilisation sur une carte circuit imprimé nécessite des pastilles de connexion adéquates et une excellente qualité des soudures. Par ailleurs, la force d'insertion des éléments mâles/femelles de ces connecteurs nécessite d'être compensée par un support mécanique adéquat de la carte afin qu'elle ne se plie pas lors de leur insertion. L'épaisseur recommandée de la carte pour cette mise en œuvre est de 1,6 mm. Les **figures 8a** et **8b** montrent, respectivement, la face composants et la face soudures d'un exemple de PCB conçu au laboratoire de l'auteur.

Sur la partie à gauche de la face composants, on peut remarquer la présence d'une paire de cosses Faston prévues pour les connexions des tensions élevées, la paire située sur la droite étant réservée aux entrées à faible tension. La sérigraphie indique clairement, par une ligne épaisse, la limite entre la zone à tension élevée et celle des signaux à faible tension. La mention "Attention haute-tension" est cependant absente.

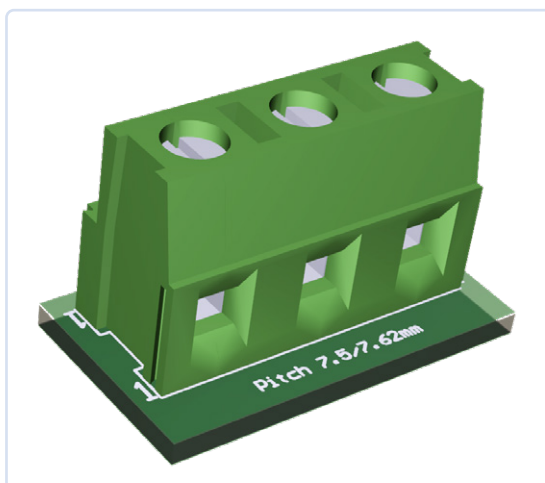


Figure 7. Solution sans compromis utilisant un connecteur à vis de pas 7,5/7,62 mm, qui ne nécessite pas de précautions particulières, et permet également une alimentation par une tension plus élevée que celle du secteur électrique standard.

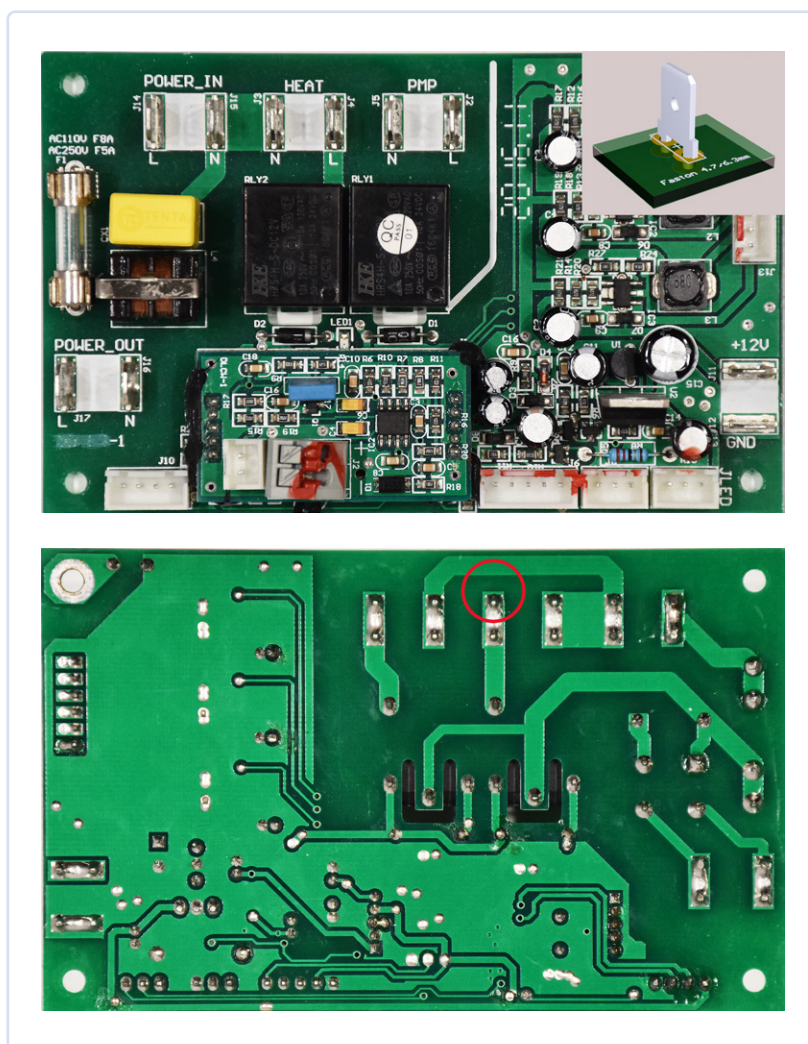


Figure 8. Carte avec contrôle de la dissipation thermique, vues des faces composants et soudure. En haut et à gauche se trouve une représentation 3D de la borne Faston utilisée. Remarquez l'espacement important entre les connecteurs et la ligne blanche délimitant les zones à haute et basse tensions. Sur la face soudure, la zone élargie renforçant la soudure des bornes Faston est indispensable, tout comme les découpes d'isolement en U près des relais. Notez la distance minimum (2,5 mm) entre le Neutre et la Phase repérée par un cercle rouge. (Source : laboratoire de l'auteur).

## L'effet Joule

Dans tout circuit électrique, quand un courant traverse un conducteur, une partie de l'énergie n'est pas transférée, mais dissipée sous d'autres formes d'énergie ; principalement de la chaleur. Ce phénomène qui concerne tout type de courant continu ou alternatif, est appelé l'Effet Joule. Pour comprendre pourquoi cela se produit, il faut considérer le conducteur au niveau microscopique. Un courant électrique est généré par un flux de charges se déplaçant toutes dans la même direction, en raison du champ électrique créé par une source de tension. Les électrons libres mis en mouvement dans le conducteur par le champ électrique ne suivent pas une trajectoire parfaitement linéaire, mais un déplacement sinuex en raison de la présence d'atomes ou molécules dans le réseau cristallin du matériau, changeant leur direction de déplacement, en libérant un peu d'énergie lors de leurs collisions avec les éléments constitutifs. Ces derniers absorbent l'énergie libérée par les électrons et augmentent leur mouvement oscillatoire autour de leurs positions d'équilibre ; Il en résulte une agitation des atomes et molécules correspondant à une élévation de température du matériau conducteur. Dans certaines applications comme les appareils de chauffage à air ou eau, ou dans les lampes à incandescence, ce phénomène est mis à profit intentionnellement, pour convertir un maximum d'énergie électrique en chaleur. Dans les circuits électroniques — il en va différemment — l'effet Joule doit être minimisé afin de permettre un fonctionnement sécurisé et fiable des appareils.

Figure 9. Paramètres du menu Conductor Properties (Propriétés des pistes conductrices) du Toolkit PCB Saturn montrant un cas critique : une piste utilisée pour le passage d'un courant de 3 A qui (selon le standard IPC-2152) est prévue pour une intensité maximale de 1,99 A. Un travail de modification de cette conception est ici indispensable !

La face soudure de la carte montre les plots de support des cosses Faston, qui ont été conçus sans masque de soudure. Ce choix augmente la surface soudée et en conséquence la résistance mécanique des liaisons. L'espacement entre les contacts est important avec une exception (entourée en rouge), où la distance entre les pistes est de 2,5 mm, le minimum imposé par le standard IPC-2221B. Une autre bonne solution d'isolement toutefois nécessaire, a été mise en œuvre par les deux fraisages en U aménagés entre les connexions à haute-tension des relais et leurs plots respectifs reliés aux bobines à basse tension.

## Restons froids !

Un autre aspect de la sécurité concerne la dissipation calorifique. Dans un circuit électrique ou électronique, les conducteurs peuvent s'échauffer en raison du courant qui les traverse, selon l'**Effet Joule**, à propos duquel vous pourrez trouver plus d'informations dans l'encadré de cet article.

Pour permettre un contrôle correct de l'échauffement dans une carte à circuit imprimé, la chaleur produite doit être évacuée, afin de maintenir le circuit à une température acceptable durant son fonctionnement. La température ambiante et la ventilation sont des facteurs clés à la base de toute évaluation thermique durant la phase de conception.

Observons l'onglet **Conductor Properties** du Toolkit PCB Saturn (**figure 9**), dans lequel les paramètres les plus importants doivent être informés et les options correspondantes à notre conception choisies. En ce qui concerne le type de PCB :

- Material Selection (sélection du matériau)
- PCB Thickness (épaisseur du support)
- Base Copper Weight (épaisseur du cuivre)
- Plating Thickness (épaisseur du plaquage métallique)
- Bottom Copper Layer (yes/no) (face inférieure cuivrée oui/non)

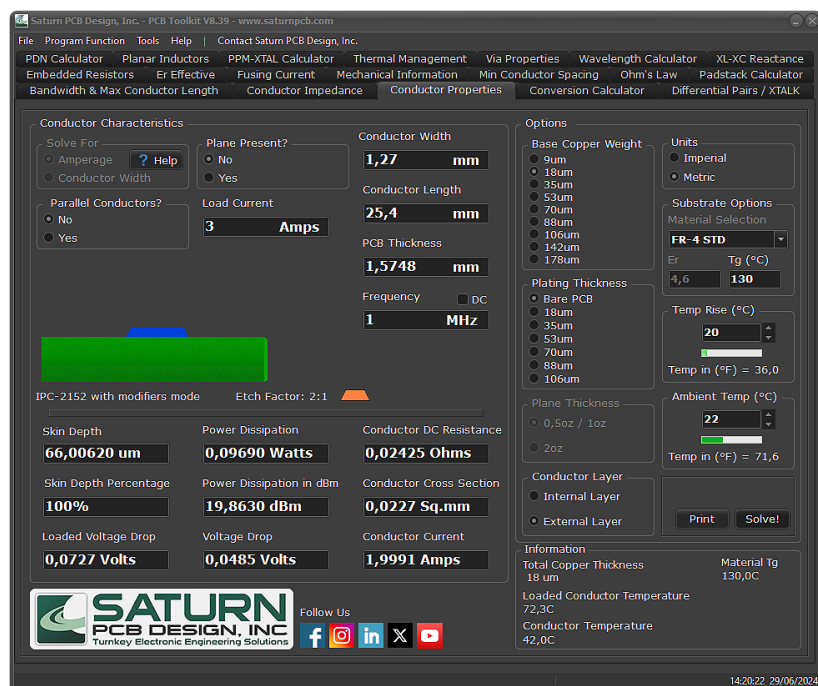
En ce qui concerne les dimensions des pistes :

- Conductor Width (largeur des pistes)
- Conductor Length (longueur des conducteurs)
- Parallel-Connected Conductors (conducteurs reliés en parallèle)

En ce qui concerne les paramètres d'environnement :

- Ambient Temperature (°C) (température ambiante en °C)
- Temperature Rise (°C) (élévation de température en °C)

Supposons que nous ayons un circuit imprimé de 1,6 mm d'épaisseur de type FR4-STD, avec une seule couche cuivrée, nue, de 18 µ, et que nous souhaitons évaluer les performances thermiques d'une piste de largeur 1,5 mm, de longueur 25,4 mm, parcourue par un courant de 3 A. À la lecture des résultats obtenus en cliquant sur le bouton **Solve** (calcul) après avoir entré les paramètres nécessaires, on constate que selon le standard IPC-2152 [5], notre piste autorise un courant de 1,991 A (**Conductor current** dans le menu), alors que nos contraintes sont de 3 A. Le courant indiqué est déterminé pour une élévation de température de 20°C à une température ambiante initiale de 22°C ce qui porte la piste à la température de  $22 + 20 = 42^{\circ}\text{C}$ .





Par un mécanisme de rétro-ingénierie, le programme nous permet de simuler une situation existante. En supposant que l'on ait besoin de maintenir un courant de 3 A dans notre piste — sans modifier ses propriétés électriques (résistance) — en cliquant sur le paramètre *Temp Rise* (augmentation de la température) jusqu'à obtention d'une valeur indiquée proche de 3 A, on constaterait que l'élévation de température atteindrait 49°C, qui ajoutée à la température ambiante, de 22°C, porterait la température de fonctionnement à 71°C, trop élevée pour un fonctionnement continu.

Ceci, même avant d'avoir considéré la dissipation thermique de tous les composants de puissance installés sur la carte — résistances, diodes, semi-conducteurs de puissance, circuits intégrés, régulateurs de tensions etc. — dont les apports calorifiques doivent être ajoutés à notre cas. L'évaluation thermique globale d'un circuit imprimé nécessite une modélisation complexe qui est en dehors de l'objectif de cet article, mais qui pourrait être l'objet d'un prochain article.

Il y a plusieurs solutions pour cet exemple, examinons quelques-unes d'entre elles :

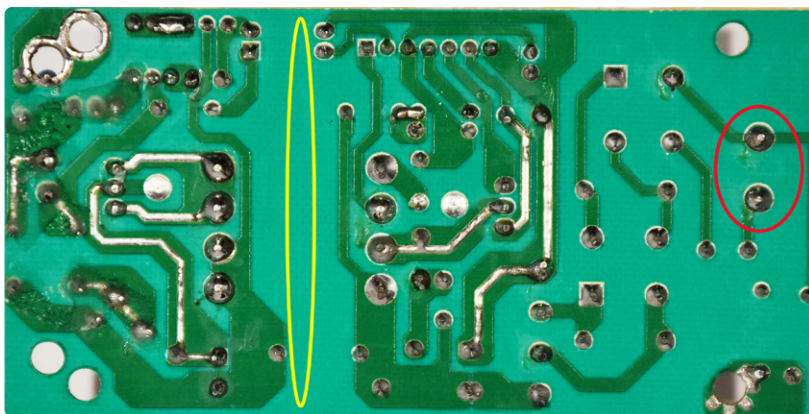
**Augmentation de la taille de la piste :** en augmentant la largeur et/ou l'épaisseur de la piste (en choisissant un circuit imprimé dont la couche cuivrée est plus épaisse, ou plaquée, ou les deux), l'intensité admissible augmente considérablement. Toutefois, dans le cas où des contraintes d'encombrement existent, l'augmentation de la largeur des pistes doit s'accompagner du respect des conditions d'isolement entre-elles (distance minimum, comme décrit précédemment)), et cette approche n'est pas toujours possible.

**Augmentation de l'épaisseur de la piste par dépôt de soudure :** c'est certainement la plus pratique et la plus économique des solutions. Elle permet d'accroître la capacité d'une piste à véhiculer le courant, sans augmenter sa largeur. Un bon exemple est illustré sur la **figure 10**, concernant une alimentation à découpage, où les pistes parcourues par un courant important dans la section à tension élevée et dans celle à basse tension, ont été renforcées par de la soudure à l'étain.

**Couche de cuivre externe :** sur les circuits imprimés comportant deux couches ou davantage, la couche de cuivre inférieure se comporte comme un dissipateur de chaleur. Sa présence, en addition d'être un blindage efficace du circuit, aide à évacuer la chaleur et augmente la performance thermique du circuit.

**Pistes multiples :** la circulation du courant peut être répartie entre deux pistes, ou davantage, reliées en parallèle ce qui accroît la dissipation thermique et le courant pouvant circuler. Le logiciel de conception de PCB Saturn vous permet de définir le nombre de telles pistes et effectue les calculs en conséquence.

S'il y a suffisamment de place sur le plan du circuit imprimé, la largeur de piste peut être augmentée dans le paramètre *Conductor Width* (largeur des pistes)

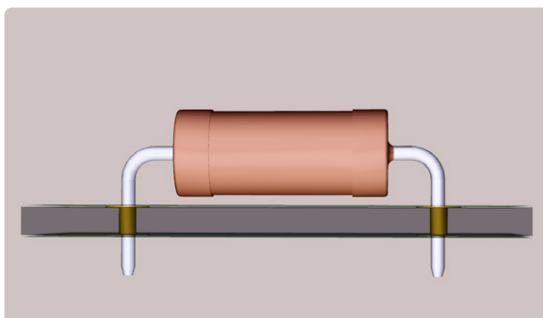


jusqu'à obtenir un résultat de 3 A dans la valeur *Conductor Current* (*Intensité dans les pistes*) ; dans ce cas il s'agirait de 2,6 mm, qui permet, selon les spécifications, une intensité de 3,03 A.

Toutefois, dans le cas d'un espace restreint, la solution simple décrite précédemment n'est pas possible, l'intensité de 3 A dans la piste pourrait être obtenue en choisissant un PCB 18μ plaqué (cuivre d'épaisseur 18μ comportant un plaquage), ou de préférence, une couche de de cuivre 35μ au lieu de celle de 18μ. Ces choix pourront toutefois avoir un impact sur le coût du circuit.

Par ailleurs, si l'option choisie est l'augmentation d'épaisseur de la piste avec de la soudure à l'étain, il faut se rappeler qu'après soudage, il ne sera plus possible de connaître la résistivité de la piste de façon théorique, mais uniquement en la mesurant avec un milliohmètre avant de placer les composants sur la carte. Cette solution peut être viable si le nombre de pistes véhiculant des courants élevés est faible, mais pas dans les autres situations où l'accroissement de l'épaisseur du cuivre et le plaquage métallique est certainement l'approche la plus professionnelle.

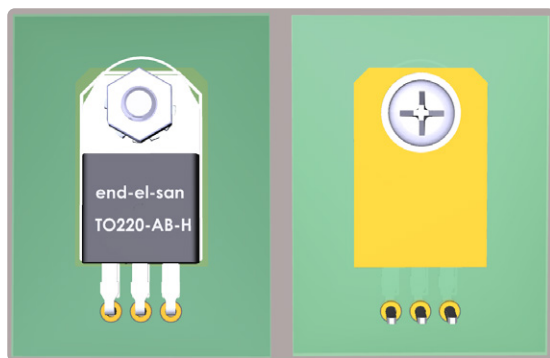
En plus de la chaleur générée par le courant circulant dans les pistes, il faut évidemment considérer attentivement les composants qui dissipent une quantité non négligeable de chaleur, comme par exemple les résistances et les diodes de puissance. Il n'est jamais recommandé de se fier au circuit imprimé pour dissiper (partiellement) par contact, la chaleur générée par un composant, sauf si la conception de son boîtier a été spécialement conçue pour cela. Par exemple, sur la **figure 11**, le composant est soudé dans une position éloignée de la surface du PCB. Cela facilite le refroidissement par convection (air) et évite un stress thermique du matériau support du PCB, par contacts sur de petites surfaces.



▲  
**Figure 10.** Face soudure d'un circuit imprimé d'une alimentation à découpage de 12 V. Les pistes renforcées par de la soudure sont clairement visibles. Remarquez l'alimentation par le secteur électrique de 230 V sur un connecteur de pas 762 mm à droite (en rouge) et la grande zone d'isolement (>7 mm en jaune) entre les zones à haute et basse tensions du circuit. (Source : laboratoire de l'auteur).

**Figure 11.** Résistance de puissance placée légèrement en hauteur par rapport à la surface de la carte. Cela améliore la ventilation du composant et réduit le stress thermique du PCB.

Figure 12. Un circuit intégré en boîtier TO-220 placé sur un circuit imprimé avec une petite zone sur la face opposée afin de faciliter la dissipation de la chaleur générée.



À l'opposé, dans l'exemple de la **figure 12**, le composant en boîtier TO-220 (à gauche) est inséré sur le PCB à un emplacement où une petite surface de dissipation de chaleur a été créée sur la face opposée aux composants (à droite). Cette solution est assez pratique dans les situations où la chaleur dissipée par le composant est trop importante pour envisager un montage vertical sans radiateur, mais trop faible pour justifier l'utilisation d'un radiateur métallique qui augmenterait l'encombrement.

### Avant de conclure

Avant de terminer notre tour d'horizon, je crois utile de mentionner que la norme IPC-2221B, à laquelle quelques exemples de cet article se sont référés, est la moins restrictive au niveau industriel en ce qui concerne l'isolement, et les espacements prescrits ne peuvent pas être réduits. Pour des applications critiques, comme certains types d'appareils domestiques, ou pour des équipements médicaux, il existe des standards plus exigeants comme, par exemple, IEC 60335, que nous vous conseillons de consulter selon les besoins de vos projets.

Je voudrais remercier Marco Castiglioni, professionnel talentueux dans le routage des cartes à circuits imprimés pour l'industrie, pour la préparation de tous les documents 3D, et spécialement pour son travail sans relâche de consultant, lors de l'écriture de cet article. ◀

VF : Jean Boyer — 230570-04

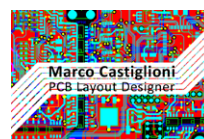
### Questions ou commentaires ?

Avez-vous des questions ou commentaires relatifs à cet article ? Contactez Roberto Armani (roberto.armani@elektor.com) ou Marco Castiglioni (info@masterista.it).



### À propos de Roberto Armani

Roberto Armani est ingénieur en électronique. Après ses études à Politecnico de Milan, il a acquis une expérience de 35 ans dans divers secteurs. Avant de rejoindre l'équipe Elektor, en tant qu'Éditeur Senior, il a travaillé dans l'industrie informatique, l'imagerie électronique, les télécommunications, les équipements de test des matériaux et les publication Web. En dehors de l'électronique, il aime écouter (et chanter) la musique classique, et randonner en haute montagne.



### À propos de Marco Castiglioni

Marco Castiglioni est ingénieur spécialisé en électronique. Après ses études, il a d'abord travaillé comme concepteur de circuits imprimés dans une compagnie Italienne d'équipement audio professionnels, dans laquelle il a utilisé des outils de conception tels que Cadstar, Orcad, Protel, Pcad et Veribest. En 1985, il crée sa société, spécialisée dans le routage de circuits imprimés pour des sociétés de tous secteurs d'activités (Audio, Medical, Industriel, éclairages à LED, Domotique etc.). Après 30 ans, il est toujours actif dans la profession, continuant à apprendre, et se maintenir à jour, sur les règles en vigueur et les nouvelles technologies relatives à la fabrication des cartes à circuit imprimé. Vous pourrez le rencontrer lors de plusieurs conventions cinématographiques ou humoristiques, déguisé en humanoïde au stand Star Trek. Il peut être contacté à [info@msterista.it](mailto:info@msterista.it) – [www.masterista.it](http://www.masterista.it)



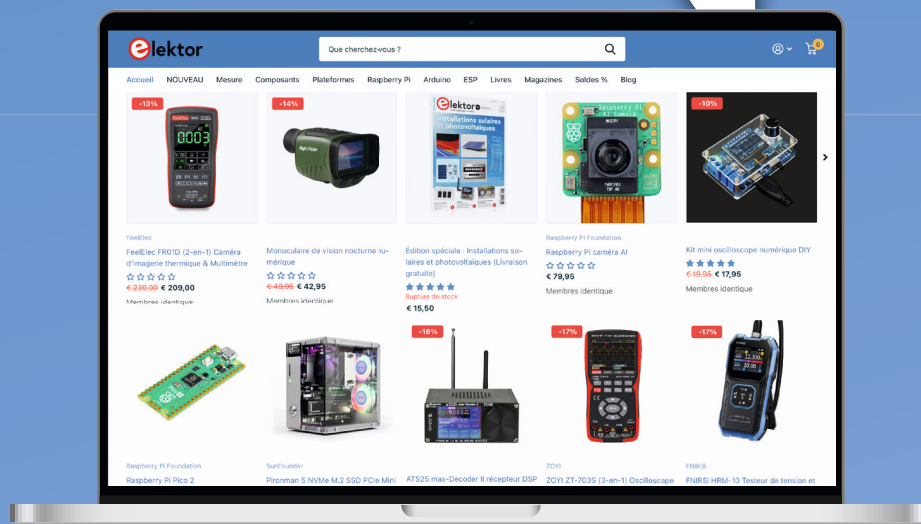
### Produits

- Whadda WTS100 Kit de démarrage de soudure  
[www.elektor.fr/20426](http://www.elektor.fr/20426)
- Weller ESF 120ESD Support pour circuit imprimé  
[www.elektor.fr/17481](http://www.elektor.fr/17481)

### LIENS

- [1] Chronologie de l'histoire des Circuits imprimés : <https://www.printedcircuits.com/blog/history-of-pcbs/>
- [2] Contenu du document des standards IPC-4101E concernant les matériaux de base des circuits imprimés : <https://www.ipc.org/TOC/TOC-IPC-4101E.pdf>
- [3] Page de téléchargement des outils de conception des PCB Saturn : <https://saturnpcb.com/saturn-pcb-toolkit/>
- [4] Contenu du document des standards IPC-2221B concernant les circuits imprimés rigides et multicouches : <https://www.ipc.org/TOC/IPC-2221B.pdf>
- [5] Contenu du document des standards IPC-2152 permettant de déterminer les capacités de passage du courant dans une carte à circuit imprimé : <https://www.ipc.org/TOC/IPC-2152.pdf>

# Quel est votre avis ?



Chez Elektor, nous offrons bien plus que de simples produits électroniques – nous créons une expérience avec des produits de qualité et un service client exceptionnel, soutenus par la passion de notre communauté.

Partagez votre avis sur  
[www.elektor.fr/pages/customer-reviews](http://www.elektor.fr/pages/customer-reviews)



## Très bonne présentation

Malgré mon anglais technique poussif, la présentation et le développement du sujet aident vraiment le novice que je suis. Les programmes, sur fond bleu, se détachent parfaitement du reste du texte.



## Un utilisateur satisfait de son achat

Excellent rapport qualité/prix, regulation en température précise, n'a rien à envier à une marque commençant par un "W", dont les produits équivalent sont beaucoup plus chers. Je conseille cette station de soudage.



## Très bon service client Elektor

Malgré un problème de composants oubliés, j'ai reçu un autre exemplaire du kit dans un délai très rapide.

Bravo pour cette efficacité devenue trop rare.