

# concevoir un circuit imprimé ? pas si facile !

## de l'art de placer des pistes

Même si une approche aussi naïve peut marcher pour des montages simples, de faible puissance et à basse fréquence, c'est une erreur. Les montages simples ont aussi besoin de bons CI. Non seulement les bons CI font que le montage fonctionne et est fiable, mais ils limitent aussi au maximum les problèmes de CEM, ils ont des points de test pour l'assemblage et la réparation et ils sont faciles à intégrer dans le montage final. Parce qu'une carte de CI est un composant à part entière du système, elle doit être de même qualité que les autres composants. La conception d'un CI n'est pas destinée à plaire à son concepteur ; elle doit plaire à son utilisateur final, quel qu'il soit (**fig. 1**).

Dans ce qui suit, j'utilise des acronymes et du jargon. Référez-vous au **Glossaire** plus loin dans cet article pour mieux comprendre le texte. De plus, malgré sa longueur, cet article est loin d'être complet. La conception de CI est tout simplement un sujet trop vaste pour être traité intégralement ici.

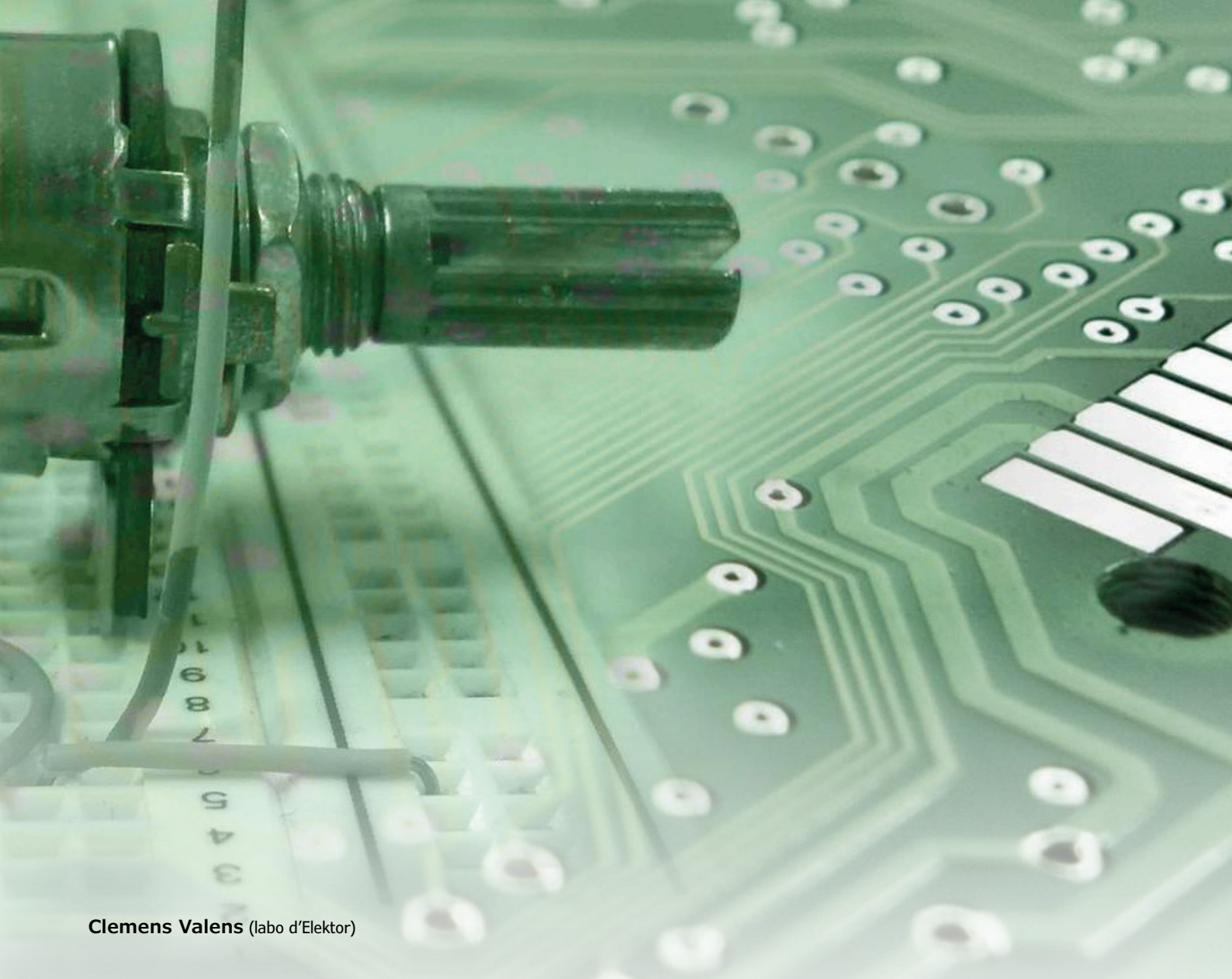
### Intégration dans le système

La première étape – généralement ignorée – implique d'étudier comment intégrer la carte dans le système. Quelle forme lui donner ? Où placer les trous de fixation ? Combien ? Et les câbles et fils de et vers la carte ? D'où viennent-ils, où vont-ils ? Y a-t-il une hauteur limite ? D'éventuels problèmes de chaleur ? Comment interagit l'utilisateur avec la carte ? Y a-t-il des câbles à brancher ? À l'avant, à l'arrière, sur un côté ? Codeur rotatif ou boutons-poussoirs ? Afficheur ? LED ? Des problèmes potentiels avec le matériau du boîtier ? Oh oui – un autre aspect secondaire – l'alimentation électrique ?

Même si le système se limite à votre montage fixé dans un boîtier, avant de concevoir le CI, choisissez un boîtier adéquat et adaptez la taille et la forme du CI à celui-ci.

À moins d'exceller dans le travail du métal, du bois et du plastique, ou de disposer de machines à commande numérique et de découpe laser, limitez au maximum la partie mécanique.





Clemens Valens (labo d'Elektor)

**Pour beaucoup, concevoir un circuit imprimé (CI) n'est qu'un détail ou une tâche secondaire. Une fois le montage soigneusement testé, ils l'implantent sans trop réfléchir sur une carte pour le rendre plus facile à déplacer et ne pas avoir de fils qui se débranchent ou de composants qui tombent. Comme ils ont tort...**

### Fabrication de la carte

Autre question importante : comment est fabriquée la carte ? Gravure à la maison ? Êtes-vous à l'aise avec ça ? Sinon, évitez les vias et restez en simple face. Les cartes double-face exigent un parfait alignement des films du dessus et du dessous, et les vias métallisés peuvent demander un gros travail, surtout s'ils sont nombreux. Ceci dit, beaucoup obtiennent de très bons résultats à la maison avec des cartes double-face ; c'est surtout une affaire de savoir-faire et d'expérience. Vous devriez éviter les plans de masse et autres aplats cuivrés, car vous n'avez pas de masque de soudure pour éviter les ponts de soudure. Trouver et couper des courts-circuits presque invisibles n'est pas non plus un travail agréable. Pourquoi ne pas élargir les pistes pour éviter qu'elles ne soient rongées par le liquide de gravure ? Pour éviter les ponts de cuivre, ne mettez pas les pistes trop proches les unes des autres. Mettez des pastilles plus grandes si vous n'êtes pas trop bon en perçage (**fig. 2**).



Figure 1. Votre carte peut être réalisée dans une usine comme celle-ci, quelque part très loin de votre point de vue. Donc, pour avoir les meilleures chances de succès, concevez-la de façon à ce qu'elle puisse être faite avec le moins d'explications possible.

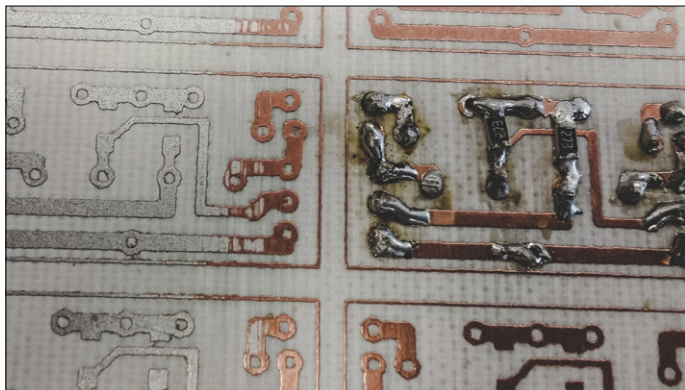


Figure 2. Un panneau gravé à domicile avec beaucoup de trous restant à percer et de découpes à faire. Est-ce que cela vaut réellement la peine de faire ça vous-même ?

Une fraiseuse à CI a des exigences similaires, mais à moins que vous ne soyez un très bon graveur, elle a une meilleure précision. La densité des pistes peut être supérieure, mais pas trop non plus. Si le fraisage est trop profond, des pistes peuvent disparaître. À l'inverse, si le fraisage n'est pas assez profond, des courts-circuits peuvent se créer. Si la carte n'est pas plate, les deux problèmes peuvent survenir simultanément. N'oubliez pas non plus que contrairement à la gravure, le fraisage laisse le cuivre inutilisé sur la carte. Ceci rend le soudage plus difficile (là encore, pas de masque de soudure), mais peut aussi créer des situations dangereuses avec des montages connectés à des hautes tensions (réseau CA) parce que les distances entre pistes ne sont plus respectées. Ceci peut aussi poser problème pour les montages avec des entrées à haute impédance. On peut fraiser le cuivre inutilisé, mais cela allonge le temps de fabrication de la carte.

Vous pouvez fraiser manuellement une carte avec un outil de type Dremel ou avec des embouts de fraisage adaptés comme ces forets arrondis qu'utilise votre dentiste. Comme lui/elle, entraînement et habileté sont nécessaires pour obtenir des résultats sans effort.

Ensuite il y a, bien sûr, la voie professionnelle. Les services

de groupage qui combinent votre projet avec ceux d'autres clients sur une carte de grande dimension sont largement présents sur l'internet. Comme les prix et délais de livraison varient beaucoup, comparez plusieurs fournisseurs. Les prix dépendent surtout de la surface de la carte, de sa classe, du nombre de couches et du délai de fabrication, et l'ajout d'options augmentera le prix. Certains services permettent de supprimer des options, d'autres non et vous pouvez finir avec des caractéristiques inutiles pour vous. Les services de groupage délocalisés semblent attractifs, mais les délais de livraison ne sont pas toujours respectés et les colis peuvent se perdre. Certains services proposent un prix par carte incluant le port, d'autres facturent la préparation et/ou les coûts d'outillage.

Généralement il n'y a aucune raison de dessiner un CI aussi petit que possible. Il sera moins cher à produire, mais la carte sera plus difficile à router, plus compliquée à intégrer et encore plus à réparer.

Un mot sur le fraisage : quelquefois un fraisage non circulaire est nécessaire pour ajuster une pièce ou pour accéder à quelque chose. Malheureusement il faudra encore un autre outil de fraisage, ce qui augmentera sans doute le prix de la carte. Certains fabricants n'ajoutent pas de coûts si le foret de fraisage est le même que celui utilisé pour le contour de la carte. Le fraisage peut ne pas être aussi détaillé et précis que souhaité, alors avant de fraiser des formes, vérifiez auprès du fabricant ce qui est possible ou pas.

### Placement des composants

Les composants ne peuvent pas être mis n'importe où ou n'importe comment, même quand le circuit vous permet ce luxe virtuel. Pour faciliter le montage, la vérification et la réparation, les composants doivent être disposés en lignes et colonnes, et orientés uniformément. Cela paraît inutile si vous assemblez vous-même, mais cela vous facilitera la vie, de même qu'aux professionnels de l'assemblage/réparation des cartes.

Pour des raisons électriques, les composants doivent – en général – être placés aussi proche que possible les uns des autres. Bien sûr, il y a bien d'autres critères à prendre en compte ici, comme les chemins de retour de courant, éviter la diaphonie et autres couplages inductifs ou capacitifs non désirés, etc. Bref,

## Petit glossaire de la conception de CI

Aplat (cuivre) : voir Plan  
 Auto-routeur : Saint Graal des développeurs de logiciel de conception de CI  
 Borne : voir Broche  
**Bottom** : couche inférieure de la pile de la carte, nommée aussi côté soudure  
 Broche : point de connexion d'un composant comme une pastille, une broche, un contact, etc.  
 Chevelu : une représentation visuelle de tous les réseaux non connectés  
 CI : Circuit Imprimé  
 Classe : résolution ou densité d'un CI ; plus la classe est élevée, plus les éléments du CI et les espacements peuvent être petits  
 CMS : Composant à Montage en Surface, utilisant la technologie TMS  
 Couche : surface supportant des éléments

du CI comme les pistes, les aplats et les composants  
 Court-circuit : connexion involontaire entre deux ou plusieurs broches  
 DRC : **Design Rule Check**, vérification que les éléments du CI respectent un jeu de règles de conception comme une largeur de piste minimale, un diamètre de perçage minimal, un espacement minimal entre pastilles, etc.  
 Élément de CI : objet imprimé sur une couche, y compris le contour de la carte  
 ERC : **Electrical Rule Check**, vérification que les réseaux sont connectés, ne se recouvrent pas, sont sans courts-circuits dus aux aplats de cuivre, etc.  
 Espacement : distance entre deux ou plusieurs éléments du CI  
 Excellon : format de données pour les machines

numériques de perçage et routage  
 Frein thermique : connexion pastille-cuivre (plan ou piste) évitant que la chaleur de la soudure ne soit absorbée par le cuivre environnant  
 Gerber : format de données vectoriel ASCII pour des images en deux dimensions et deux couleurs  
 IAR : **Inner Annular Ring**, anneau annulaire interne  
 Masque de soudure : masque avec des ouvertures où la soudure est permise. Non seulement un masque de soudure évite les courts-circuits, mais il empêche aussi la soudure de glisser de la pastille ce qui pourrait conduire à de mauvais joints de soudure ou au désalignement d'un composant CMS.



préparez avec soin le placement des composants ! Un amplificateur de puissance n'a clairement pas les mêmes exigences qu'un instrument de mesure de haute précision.

Toutefois, la technique de soudage utilisée peut encore imposer un autre jeu de contraintes. L'environnement peut aussi avoir un impact sur le placement des composants. Si l'humidité et/ou la poussière polluent la carte, il faut un espace plus grand autour des pistes et composants pour éviter les courts-circuits et les fuites. Tout ceci est étroitement lié aux normes et standards auxquels votre carte doit répondre. Même si cela peut ne pas sembler un problème pour la plupart des cartes FLTM, il y a de bonnes raisons pour que ces standards existent, et les étudier peut réellement vous apprendre une chose ou deux.

Placez les composants traversants sur le dessus, nommé aussi côté composants. Placez tous les CMS du même côté, dessus ou dessous ; évitez d'en mettre des deux côtés, car cela rend la fabrication plus chère. C'est une bonne pratique d'éviter les CMS des deux côtés, même pour une seule carte ou de petites séries (**fig. 3**).

Les cartes avec des CMS doivent avoir au moins trois mires comme points de référence pour les machines bras-transfert. Les gros circuits intégrés avec beaucoup de contacts à pas fin peuvent aussi nécessiter des mires pour garantir un alignement correct. Les cartes FLTM peuvent, bien sûr, se passer de mires, mais pourquoi ne pas prendre une habitude de professionnel ? Cela ne coûte rien.

Orientez dans la même direction tous les composants polarisés comme les condensateurs et les diodes (à moins que l'intégrité du signal ou une autre bonne raison empêche de le faire). C'est du temps gagné pendant l'assemblage de la carte, l'inspection et la recherche de panne. Indiquez toujours la polarité sur la sérigraphie.

Attention aux empreintes en miroir.

### Restez sur la grille

Travaillez sur une grille autant que possible. J'aime placer les composants et faire le routage initial sur une grille de 50 mils. Quand les choses deviennent trop denses, je bascule sur une grille de 25 mils. Quand une carte dense est presque finie, je passe sur une grille de 5 mils pour y serrer les derniers seg-

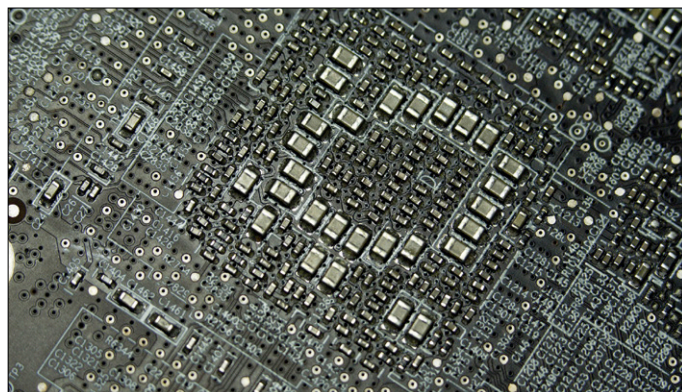


Figure 3. Pour bien découpler les circuits intégrés avec de nombreux contacts, les condensateurs de découplage peuvent être mis de l'autre côté de la carte. Notez la façon intuitive de placer les annotations des composants en dehors de la zone à densité élevée.

ments de piste. Parfois une grille de 1 mil peut être nécessaire pour placer précisément un élément tout en respectant les règles de conception (DRC). Mils, mm, peu importe l'unité choisie, mais il faut vous y tenir.

### Les pastilles

Les contacts des composants et les bornes sont soudés à des pastilles sur le CI. Pour beaucoup de composants, les pastilles assurent non seulement la connexion électrique, mais aussi leur tenue mécanique. Il est donc important que la pastille soit assez grande pour ça. En particulier les composants hauts ou lourds avec peu de bornes (par ex. les gros condensateurs) nécessitent de grandes pastilles pour éviter d'être arrachés accidentellement. Le cuivre est collé sur la carte et, en particulier lorsqu'il est chauffé (par le soudage ou le courant), il y a un risque de délaminage.

Les composants CMS ont d'habitude des pastilles oblongues. La soudure sans plomb ne s'écoule pas aussi bien que la soudure 60/40 traditionnelle, en particulier dans les coins, c'est pourquoi on a commencé à utiliser des pastilles à coins arrondis. Les pastilles CMS doivent être assez grandes pour supporter suffisamment de pâte à souder pour la soudure correcte d'une

Métallisé : recouvert avec un matériau conducteur  
Mil : un millième de pouce  
Millimètre : un millième de mètre  
Mire : marque spéciale sur un film, masque, carte, panneau, etc., pour aider l'alignement avec des caméras, pochoirs, machines, entre eux, etc.  
OAR : **Outer Annular Ring**, anneau annulaire externe  
Pastille : élément de CI pour connecter une broche  
Pierre Tombale (effet) : relevage partiel ou total d'un CMS à deux contacts pendant la refusion  
Pile : empilage ordonné de couches  
Piste : connexion entre deux ou plusieurs contacts sur un CI

Plan : grande surface de cuivre ; nommé plan d'alimentation si connecté à la masse ou à la tension d'alimentation  
Pochoir : masque pour appliquer la pâte à souder sur un CI  
**Push and shove** : router une piste en poussant et écartant les éléments environnants du CI pour créer suffisamment d'espace pour la nouvelle piste  
Réseau : connexion volontaire entre deux ou plusieurs contacts  
Réserve : protection contre la soudure ; voir Masque de soudure  
Routage : transformation des réseaux en pistes  
Sérigraphie : couche non conductrice de symboles graphiques et de texte, habituellement blanche, nommé aussi impression des composants

TMS : Technologie de Montage en Surface, pour les composants dont les contacts ne sont pas insérés dans des trous  
**Top** : couche supérieure de la pile de la carte, nommée aussi côté composant  
Trace : voir Piste  
TTT : Technologie à Trou Traversant pour les composants dont les contacts sont insérés dans des trous  
**Via** : trou métallisé connectant des pistes entre deux ou plusieurs couches différentes  
**Via stitching** : utilisation de multiples vias pour connecter un élément de cuivre sur une couche à un autre élément sur une autre couche ; souvent utilisé pour conduire la chaleur ou sur les cartes haute fréquence

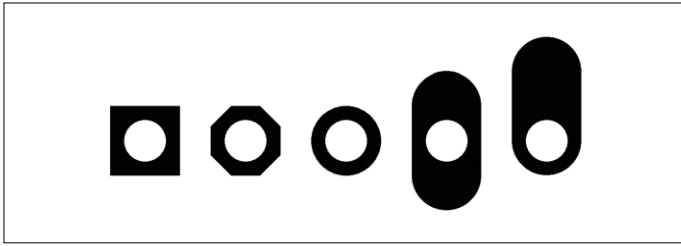


Figure 4. Une sélection de pastilles traversantes disponibles dans Eagle, outil répandu de conception de CI.

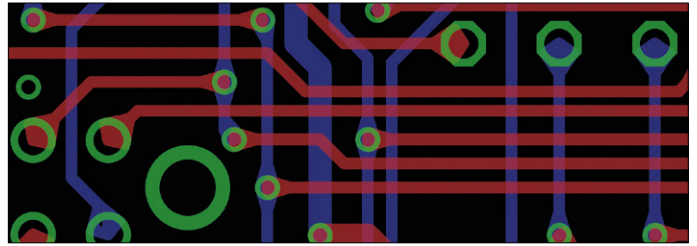


Figure 5. Pastilles effilées dans Eagle, créées avec le script goutte d'eau (ULP).

borne. Consultez la fiche technique du composant pour l'empreinte ou plage d'accueil à utiliser.

Les pastilles traversantes présentent de multiples formes (**fig. 4**). Les pastilles carrées sont souvent employées pour indiquer la broche 1 d'un composant tel un connecteur. Les pastilles octogonales sont répandues, mais les rondes sont mieux, car elles maximisent la surface de cuivre (bon pour la tenue mécanique comme pour la dissipation thermique), tout en minimisant la place requise pour respecter les règles d'espacement.

Il existe aussi des pastilles effilées ou en goutte d'eau, où la pastille se fond progressivement dans la piste connectée (**fig. 5**). En plus de donner une touche rétro à la carte, elles procurent des liaisons pastille-piste plus solides. C'est important pour les cartes qui doivent pouvoir être courbées, comme les CI souples. Tous les outils de conception de CI ne peuvent pas le faire.

Ensuite il y a le frein thermique (**fig. 6**). Si un contact d'un composant est soudé à une piste très épaisse ou à un aplat de cuivre, le cuivre entourant la pastille peut absorber la chaleur,

ce qui rend le soudage difficile. Pour éviter la dissipation de chaleur, les pastilles peuvent être connectées avec des pistes étroites – appelées rayons ou thermiques, d'habitude quatre – au cuivre environnant (c'est là que l'anneau interne « *Inner Annular Ring* », IAR, apparaît). Lorsqu'on fait de la soudure à refusion (c.-à-d. dans un four), le problème est moindre parce que toute la carte est chauffée à la même température. Ainsi il n'y a d'habitude pas de véritable raison d'utiliser les techniques de frein thermique pour les composants CMS qui seront soudés dans un four. Toutefois, l'effet « pierre tombale » – le relevage partiel ou complet d'un composant CMS pendant la refusion – peut survenir quand la masse thermique est très différente des deux côtés d'un petit composant à deux bornes (résistance ou condensateur). Un frein thermique règle ce problème. Les vias n'ont presque jamais besoin de frein thermique, car, en général, ils ne sont pas soudés.

### Les trous

Les pastilles ont souvent des trous dedans – les vias aussi. Les trous de fixation peuvent ne pas être métallisés ; les trous

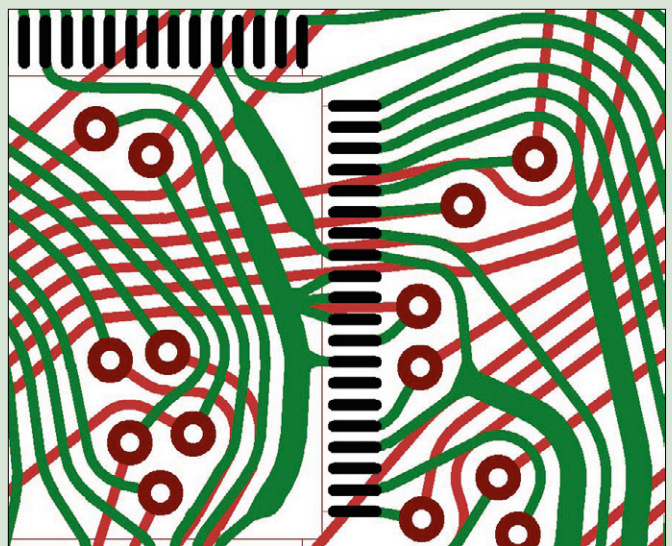
## Routage manuel ou automatique ?

Les fabricants d'outils de CAO et les scientifiques passent et ont passé beaucoup, beaucoup, beaucoup d'heures à mettre au point et améliorer des routeurs automatiques et je n'ai encore jamais été satisfait des résultats d'un seul d'entre eux. Je n'ai non plus jamais rencontré quelqu'un qui l'était. Une raison est que je n'ai sans doute jamais eu accès aux meilleurs outils existants, mais ceux que j'ai essayés soit se plantaient soit abandonnaient cinq minutes après que j'aie quitté le bureau, n'ont jamais réussi à router 100% de la carte, ou s'ils atteignaient 100% je devais passer des heures à remettre au propre, ou étaient simplement trop compliqués à mettre en œuvre. Pour toutes ces raisons, je préfère router manuellement. (De plus, je trouve que le routage est une activité très relaxante).

Le routeur automatique parvient souvent à router jusqu'à 90% de la carte, voire mieux, mais n'atteint presque jamais 100% à moins d'un circuit très simple. Quand il se bloque avant d'atteindre 100% cela signifie d'ordinaire qu'il ne reste plus de solution pour finir la carte. Cela n'implique pas que la carte ne peut pas être routée, cela signifie simplement que le routeur a bloqué sur toutes les solutions possibles. Pour s'en sortir, vous devez tant défaire que finalement il aurait été plus rapide de router la carte manuellement depuis le début.

Comme compromis, certains utilisent le routeur automatique pour voir où les problèmes de routage peuvent survenir, puis déplacent quelques composants en espérant résoudre ces poten-

tiels goulots d'étranglement et finissent en routant manuellement. D'autres utilisent le routeur automatique sur des parties (simples) de la carte puis mettent au propre ensuite.



Le « routeur topologique » Eremex TopoR n'a pas de directions de routage préférentielles pour optimiser l'utilisation de l'espace. (Source : Eremex)

dans les pastilles et les vias sont métallisés. Vous spécifiez le diamètre du trou métallisé pour vos vias et pastilles ; c'est le travail du fabricant de CI de garantir que le trou terminé respecte ce diamètre. Pour un trou métallisé, le diamètre de perçage réel doit être plus grand que spécifié en raison de l'épaisseur de la métallisation. Le perçage a une précision limitée et un trou peut être décentré (**fig. 7**). En conséquence, pour garantir qu'assez de cuivre reste autour d'un trou métallisé après avoir percé et gravé la carte, l'anneau externe (« *Outer Annular Ring* », OAR) doit être suffisamment large. L'anneau interne existe aussi (« *Inner Annular Ring* », IAR). Selon mon dictionnaire, « *annular* » signifie « en forme d'anneau », donc, techniquement parlant, des « *annular rings* » sont des « *ring rings* » (ce qui me rappelle cette belle chanson d'Abba en 1973 dont je recommande la vidéo sur YouTube. On ne fait plus de musique comme ça..., ni de tenues, *Swenglish*, guitares, coupes de cheveux, etc., mais je m'égare).

Spécifier une mauvaise taille de perçage pour un contact de composant – trop grande ou trop petite – est une erreur fréquente.

Il y a un problème avec les vias et la soudure à la vague : si un via n'est pas masqué, la soudure peut couler au travers et potentiellement endommager un composant monté au-dessus. Fermer le masque de soudure pour les vias évitera cela en général.

### Pistes et plans

Garder les pistes aussi courtes que possible : c'est évident. C'est particulièrement vrai pour les signaux haute fréquence, mais les signaux basse fréquence et même les signaux continus bénéficient aussi des pistes courtes. Les pistes courtes sont bonnes non seulement pour les signaux, mais aussi pour économiser de la place sur la carte. Certains signaux rapides peuvent nécessiter des pistes (ou une paire de pistes) d'une longueur (et impédance) précise ce qui n'est pas toujours la plus courte connexion possible.

N'utilisez pas le stylet le plus fin de votre outil de conception de CI. Les pistes étroites peuvent coûter plus et sont fragiles. Le détail le plus fin de la carte détermine la classe de fabrication de la carte ; plus la classe est haute, plus la carte est chère. Les vibrations peuvent créer des fissures dans les pistes étroites et dégrader, voire couper, des connexions. Si la carte doit être soudée à la main, ou si on prévoit des reprises, les pistes étroites peuvent aisément se délaminer quand on les chauffe trop, trop longtemps. La gravure à domicile n'est généralement pas bien contrôlée et les pistes étroites peuvent être rongées. De plus, une piste étroite peut ne pas supporter l'intensité de courant prévue. Adaptez la largeur de la piste au courant transporté, un peu plus pour la maintenir froide. De nombreux calculateurs en ligne vous aideront à déterminer la meilleure largeur pour votre piste. Une piste étroite transportant trop de courant chauffera et pourra fondre ou se casser ; c'est la chaleur qui limite le courant. Les vias doivent aussi supporter le courant. Recouvrir les pistes avec une épaisse couche de soudure augmentera le courant maximal accepté par la piste. De même, remplir un via avec de la soudure ou du cuivre pourra aussi aider. Ménager des ouvertures dans le masque de soudure sera utile dans ce cas. Plusieurs vias en parallèle sont souvent utilisés pour améliorer la conduction de courant, en limitant le risque de circuit ouvert dû à un via coupé. Bien sûr, un via plus grand peut aussi être utilisé.

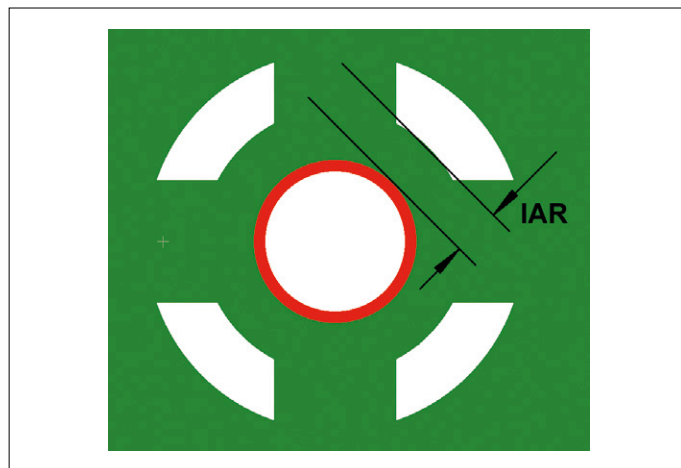


Figure 6. Le frein thermique empêche que trop de chaleur ne s'échappe dans les grands aplats de cuivre pendant le soudage. Ici, l'anneau interne minimal peut être spécifié même si c'est presque le même que l'externe. L'anneau rouge représente la métallisation du trou.

Nommer les réseaux est utile pendant le routage, car cela vous rappelle sur quel signal vous travaillez.

Maintenant, les coins ! Les pistes arrondies sont meilleures parce que, contrairement à celles avec des angles, elles ont une largeur constante. Les changements de largeur de piste provoquent des inadaptations d'impédance et des réflexions, mais seulement à très haute fréquence, donc la plupart des montages ne sont pas affectés par ces problèmes. On considère les angles droits affreux, pourtant vous en trouverez beaucoup en regardant de près les vias sur une carte. Souvent une piste sur une face continue à 90° sur une autre, et même si elle ne le fait pas, le via lui-même introduit deux angles de 90°. Les pistes avec des angles à 90° ont tendance à être plus longues que celles avec des angles de 45°. Les angles aigus peuvent aussi causer des problèmes de délaminage, des poches acides, ou un défaut de gravure. Quelquefois il est impossible d'éviter un angle aigu et dans la plupart des cas ça marche. Personnellement j'essaie de m'en tenir à des angles de 45°.

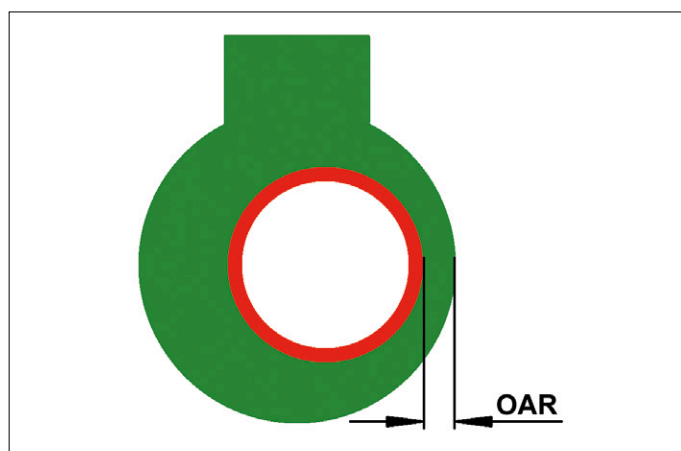


Figure 7. À cause des tolérances de fabrication, un trou peut être décentré. Pour permettre la métallisation (l'anneau rouge), le trou doit être percé plus grand que spécifié. Le trou terminé (avec métallisation) aura le diamètre spécifié. L'anneau qui reste après perçage est l'anneau externe. L'anneau externe minimal acceptable montré ici est spécifié dans les règles de conception.



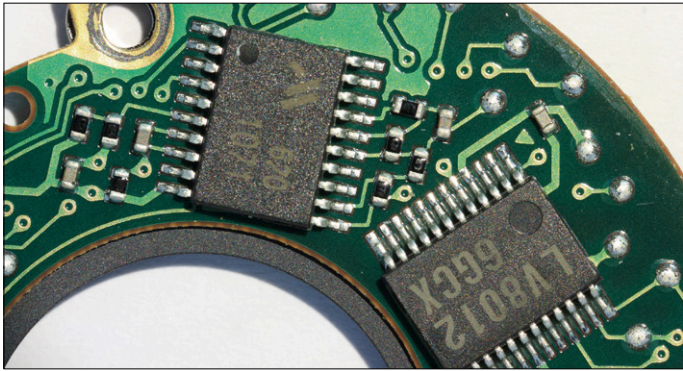


Figure 8. Pas d'annotations de composants, uniquement le marquage de la broche 1, pistes avec toutes sortes d'angles et vias en goutte d'eau. Une fois que vous savez ce que vous faites, c'est une *pratique répandue* d'être tolérant avec la *bonne pratique*.

L'utilisation d'un plan d'alimentation ou d'aplat de cuivre (habituel pour la masse) économisera beaucoup de travail et sera bon du point de vue CEM. Cependant, attention quand vous utilisez plusieurs plans d'alimentation, en particulier proches des bords de la carte et des trous de fixation où des objets métalliques et vis d'assemblage pourraient créer des courts-circuits involontaires entre les plans. Finissez toujours par une vérification des règles électriques (ERC) pour vous assurer que tous les courts-circuits et circuits ouverts ont été corrigés.

Quand vous utilisez un plan ou un aplat pour un réseau, ne routez pas ce réseau, mais laissez l'aplat de cuivre le faire pour vous. Attention aux connexions très fines, comme involontaires, entre des sections de plan, qui peuvent être rongées et couper la continuité du plan. De tels plans sont inadaptés pour la gravure à domicile. Pour empêcher cela, commencez avec un espacement large pour les aplats de cuivre et voyez si le cuivre s'étale partout. Déplacez les pistes et les vias pour améliorer l'écoulement du cuivre. Quand vous êtes satisfait de l'aplat, diminuez l'espacement.

Notez que les plans ont une influence sur la distribution du cuivre de la carte. Quand le cuivre n'est pas réparti régulièrement, la gravure peut devenir irrégulière, et entraîner une répartition irrégulière de l'épaisseur du cuivre pouvant courber le CI aux températures extrêmes (comme dans les applications automobiles).

### Appliquez les règles de conception

Utilisez la vérification des règles de conception (DRC) et des règles électriques (ERC) pour vous assurer que tous les éléments du CI les respectent. De bonnes règles de conception aident à éviter que des pistes ne se chevauchent ou passent trop près des bords de la carte, à trouver des diamètres de perçage et espacements incorrects, et bien plus. Utilisez-les ! Lorsque vous pensez que la carte est prête, assurez-vous que tous les réseaux sont bien connectés. Ne laissez pas d'avertissements ni d'erreurs, même s'ils sont acceptables pour vous parce qu'ils pourraient perturber la personne qui héritera du projet – ou vous-même lorsque vous le redécouvrirez six mois plus tard. Si vous devez tolérer un avertissement, documentez pourquoi. Si possible changez la règle de conception qui vous gêne pour le faire disparaître, mais assurez-vous que la nouvelle règle est acceptable pour votre application, de même que pour votre fabricant de carte.

### Marquages et impression de composants

Essayez de mettre des annotations pour tous les contours de composants et assurez-vous qu'ils demeurent visibles après le montage. J'aime orienter les annotations dans le même sens que les composants, en lignes et colonnes (voir aussi figure 3). Indiquez la broche 1 sur tous les connecteurs, barrettes, et tous les composants où elle n'est pas clairement identifiable. Marquez aussi la polarité de tous les composants polarisés comme les condensateurs et les diodes (**fig. 8**).

Évitez les marquages sous les composants CMS, en particulier ceux à deux plots, car cela rend leur assise bancale et peut conduire à l'effet « pierre tombale ».

Gardez le texte lisible et utilisez des étiquettes pour guider l'utilisateur quand c'est utile. Notez que les ouvertures dans le masque de soudure sont d'habitude légèrement plus grandes que les pastilles, et que chaque sérigraphie traversant ces ouvertures est coupée, donc assurez-vous que le texte ne les chevauche pas. Mettez un texte lisible sur toutes les couches pour éviter un retournement accidentel d'une couche. Étiquetez ou numérotez les couches pour garantir qu'elles seront empilées dans le bon ordre. Donnez à la carte un nom ou un numéro unique et n'oubliez pas d'indiquer sa version.

Si le dessous de la carte peut aussi être sérigraphié, faites-le. Les cartes FLTM n'ont pas de sérigraphie en général, mais cela ne signifie pas que vous devez oublier le texte et le marquage de polarité ; vous pouvez aussi écrire sur les couches de cuivre. Ainsi, quand c'est possible, placez des marquages et du texte tout en faisant attention à leur taille pour éviter qu'ils ne soient perdus pendant la gravure.

### Test

Prévoyez des points de test accessibles. Si possible faites que le montage produise des signaux de test utiles. Les broches des composants ne doivent pas servir de points de test, car une sonde de test appuyée contre une broche peut provisoirement « réparer » un mauvais joint de soudure, feignant une bonne connexion, mauvaise le reste du temps. Les vias peuvent être utiles pour le test manuel, mais seulement quand ils sont laissés ouverts dans le masque de soudure.

### C'est tout ?

Après la lecture de ce long article, vous pourriez penser que vous en savez beaucoup sur la conception des CI, alors qu'en réalité nous n'avons qu'effleuré le sujet. Nous n'avons pas parlé, pour ne citer que cela, des chemins de retour de courant, des plans de masse multiples, de la gestion de la chaleur pendant le soudage et en fonctionnement, de la conformité avec la CEM, du traitement des signaux haute fréquence, du dessin des empreintes, etc.

La conception de CI est un vaste thème qui combine la chimie, la physique, l'électronique, la mécanique et l'automatisation. Il est plutôt amusant de découvrir que beaucoup d'aspects de la conception de CI n'ont jamais vraiment été étudiés en détail et sont simplement fondés sur du bon sens et des hypothèses. Vous trouverez sur l'internet beaucoup de discussions sur la conception des CI, donc dans le doute, demandez autour de vous. ◀

Remerciements à Malte Fischer pour ses conseils utiles.

(160397 – version française : Denis Lafourcade)

### Lien

[1] [www.elektormagazine.fr/160397](http://www.elektormagazine.fr/160397)