

Chapitre 2. Technologie de réalisation de schémas électroniques

II. 1 introduction

Pour mener à bien l'étude d'un circuit, il faut tenir compte de plusieurs critères. Certains sont d'ordre électrique, thermique, mécanique, d'autres sont les normalisations, les contraintes de standardisation, les critères de fabrication et ceux relatifs aux composants. La difficulté d'une conception est due au fait que tous ces paramètres interviennent en même temps par leur interaction, ce qui oblige le concepteur à les connaître à fond avant d'agir, et surtout à avoir un bon entraînement mental à ce type de réflexion. En définitive, une bonne conception ne peut être réalisée que par un concepteur expérimenté. L'exposé qui va suivre n'a pas la prétention d'apprendre à concevoir des circuits. Il indiquera seulement aux débutants quels sont les paramètres dont il faut tenir compte et comment les calculer. Ce sont uniquement les bases de la conception, le reste venant par la pratique d'une certaine gymnastique intellectuelle. Les compléments techniques à cet exposé peuvent être trouvés dans les normes françaises NCF 93713, UTE 93703 entre autres.

II.2 Grille internationale

En France en 1989 fut établie la norme française NF C93-713 de spécification des circuits imprimés. Les circuits sont catégorisés en différentes classes en fonction de leur utilisation et donc de la finesse de fabrication. A cette époque, la technologie se limite à la classe 6 correspondant par exemple à une largeur de piste de 120 à 150 μm .

En 2015, cette norme est encore utilisée mais tend à être supplanté par le standard IPC d'origine américaine et accepté comme une référence internationale par l'ensemble des fabricants des circuits imprimés dans le monde.

Parmi les nombreuses normes IPC définissant les standards de conception, de performances et de test des circuits imprimés on peut citer les plus importantes:

- IPC- 2221, normes générique de conception;
- IPC-4101, normes sur les matières utilisées (pré-imprégnés et stratifiés);
- IPC-A-600, critères d'acceptabilité;
- IPC-TM-650, définitions des méthodes de test.

II.3 ÉTUDE DU TRACÉ

Le tracé des pistes, également appelé impression conductrice, est le cheminement de cuivre réalisant l'interconnexion électrique des composants. Cette liaison de cuivre relie donc deux ou plusieurs broches de composants. Dans le cas le plus simple, la piste va de la patte x à la patte y, (Fig. 1 page 10), et s'arrête à la proximité de la patte. La jonction à la patte sera terminée ultérieurement par un joint de soudure. On remarque que les ensembles trou/pastille sont les points de repère du tracé. Ils conditionnent l'insertion des composants, d'une part, et le passage des pistes d'autre part. Ce sont donc les trous qui serviront de référence à l'étude du tracé, et également aux contrôles dimensionnels. Les trous sont positionnés par l'implantation des composants.

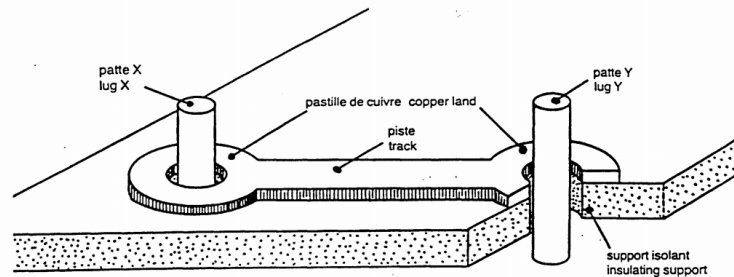


Figure 1: Pastille et piste de cuivre

II.3.1 Paramètres électriques

Une plaque de circuit imprimé est composée d'un support isolant sur lequel circulent des pistes de cuivre. A ce sujet, plusieurs éléments sont à déterminer. Ces éléments sont reportés sur la figure 2 page 10.

1. Isolement entre deux parties conductrices

Aucune matière n'est parfaitement isolante et si on applique une différence de potentiel entre deux points, il existera toujours un courant de fuite circulant dans la matière entre les deux points. La connaissance des paramètres agissant sur les courants de fuite permettra de calculer les espacements minimums à respecter entre deux pistes pour que celui-ci soit sans effet sur le fonctionnement du montage électronique. Si le courant de fuite est important, (pistes trop rapprochées), on s'expose à un fonctionnement instable, à des signaux déformés par amortissement, des vitesses de transfert ralenties, et des réglages présentant des variations aléatoires. Ces résistances parasites existent entre deux pistes de la même face, ("Ris" = résistance d'isolement superficiel), et entre deux pistes à deux niveaux différents ("Rit" = résistance d'isolement transversal), comme représenté à la figure 2. Ces résistances sont fonction de la résistivité spécifique de la matière isolante et des souillures introduites par les procédés de fabrication du circuit qui jouent un rôle important sur la résistivité de surface. Il en est de même des conditions de fonctionnement de la carte électronique : humidité de l'air et altitude.

Dans la mesure où le circuit est bien décontaminé après fabrication, et parfaitement sec, il est possible d'appliquer la relation suivante:

$$R_{is} = 160 \rho \frac{e}{L}$$

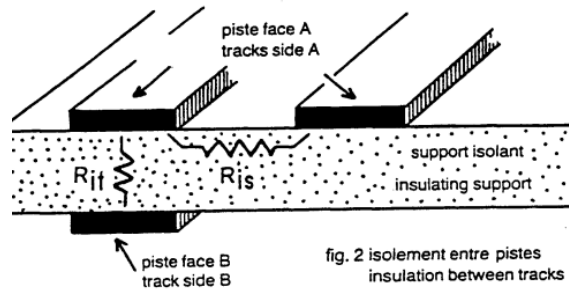
R_{is} : résistance d'isolement superficiel

ρ : résistivité de la matière, spécifiée dans la norme NCF 93711

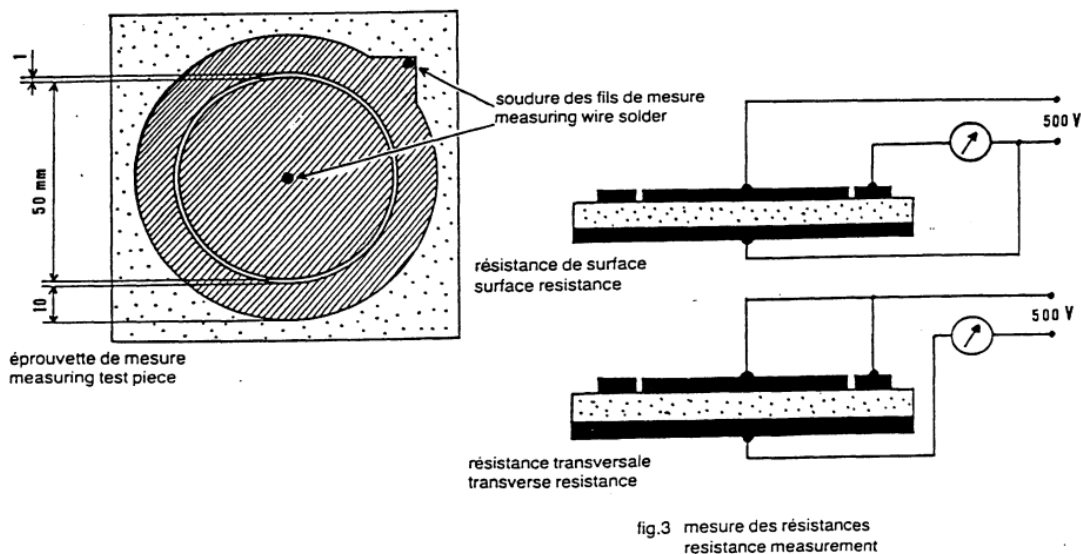
e = Espacement des pistes (mm)

L = Longueur en regard des conducteurs parallèles

En ce qui concerne la résistance transversale, R_{it} , c'est une combinaison de la résistance de surface et de la résistance volumique. Il est possible de déterminer rapidement ces paramètres en faisant un essai sur la matière elle-même. L'éprouvette de mesure est gravée par un procédé traditionnel selon le plan de la figure 3.



Les mesures de R_{is} et de R_{it} y sont faites sous une tension de $500\text{ V} \pm 50\text{ V}$ à l'aide d'un galvanomètre branché selon la figure 3. Le graphique de la figure 4 indique l'espacement minimal des conducteurs en fonction de la tension nominale entre eux, ainsi que la tension disruptive correspondante. On voit par exemple que deux pistes présentant une différence de potentiel de 100 V devront avoir un écartement minimum de $0,5\text{ mm}$, ce qui donne une tension disruptive de $1\,500\text{ V}$ en 50 Hz . ou de $2\,500\text{ V}$ en courant continu. Dans le cas où les pistes véhiculeraient des impulsions à fronts rapides ou des tensions de commutation, il ne faut pas oublier que les résistances d'isolement provoquent des amortissements allongeant les temps de commutation, ce qui déforme les signaux et ralentit la vitesse de transfert des informations. Il faut nécessairement tenir compte de ce phénomène dans la conception des circuits rapides, tels que les calculateurs, l'informatique, la commutation.



2. Intensité admissible dans une piste, largeur de piste

Une piste de section S donnée (épaisseur * largeur) et de longueur L , présente une résistance $R = \rho * L/S$ (ρ étant la résistivité du métal). Quand un courant i circule dans une piste, il s'y produit un dégagement de chaleur tel que $W = R * i^2 * t$ (dans le cas d'un courant continu) soit une puissance calorifique de $P = R * I^2$ Watts. Or, on sait que $1\text{ W} = 1\text{ J/s}$ et que $1\text{ J} = 1/4,18\text{ calories}$. Donc, à chaque seconde, il se produit $0,24 R * i^2\text{ calories}$ dans la piste en question. Ces calories sont en partie absorbées par le support isolant qui est en contact étroit avec une face de la piste. Ce support joue le rôle d'un refroidisseur et les calories

y sont évacuées par l'intermédiaire de la jonction cuivre/support. Cette jonction n'offre pas une conduction thermique parfaite et il y a donc toujours une différence de température entre le cuivre et son support, (Fig. 5). Si l'on suppose que le support reste à la température ambiante, la piste présentera alors une élévation de température. Mais puisque la température de la piste s'élève, la résistance de cette piste va augmenter selon la loi classique: $R_2 = R_1 * [1 + (T_2 - T_1)]$. Pour limiter l'échauffement qui risque de détériorer le circuit, il faut calculer la section de la piste de façon à diminuer la résistance R. L'épaisseur du cuivre étant fixe, on calcule la largeur de la piste en fonction du courant à y faire passer. A titre indicatif, une densité de courant de $27 A/mm^2$ de section dans du cuivre de $35 \mu m$ d'épaisseur provoque un échauffement de $8^\circ C$ par rapport à l'ambiante. Des abaques pratiques permettent de faire un choix rapide de la largeur (Fig. 5).

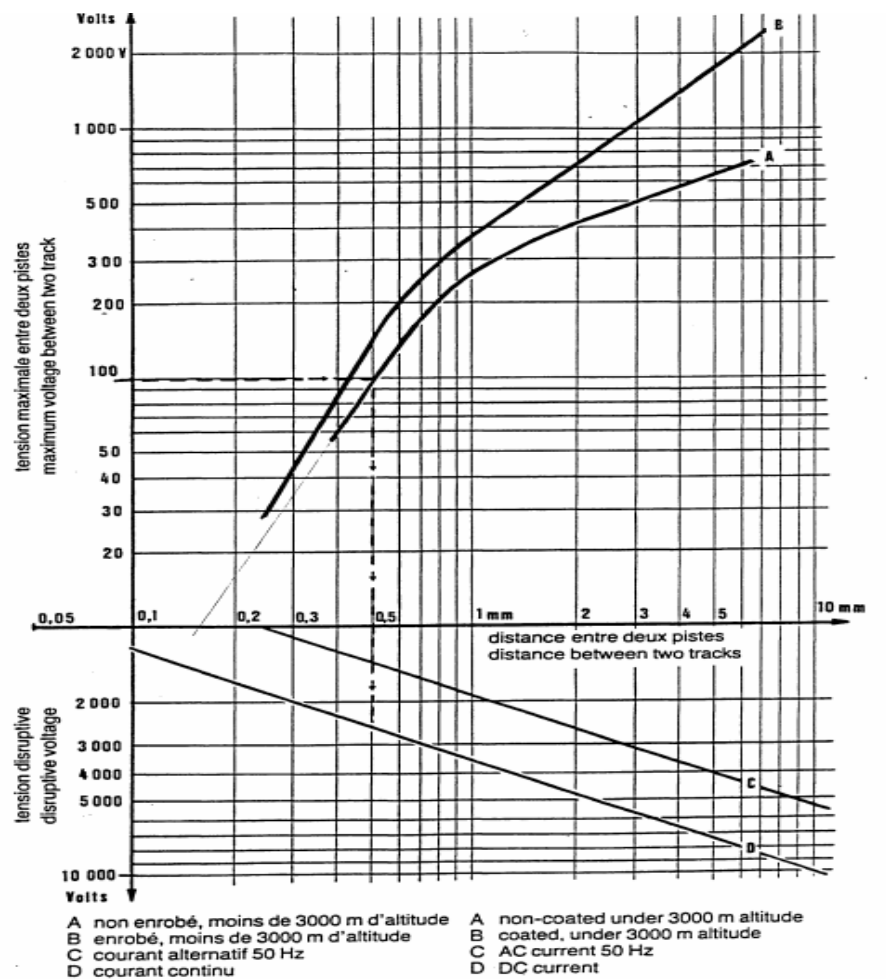


Fig. 4 : espacement des pistes
conductor track spacing

(coated = vernie)

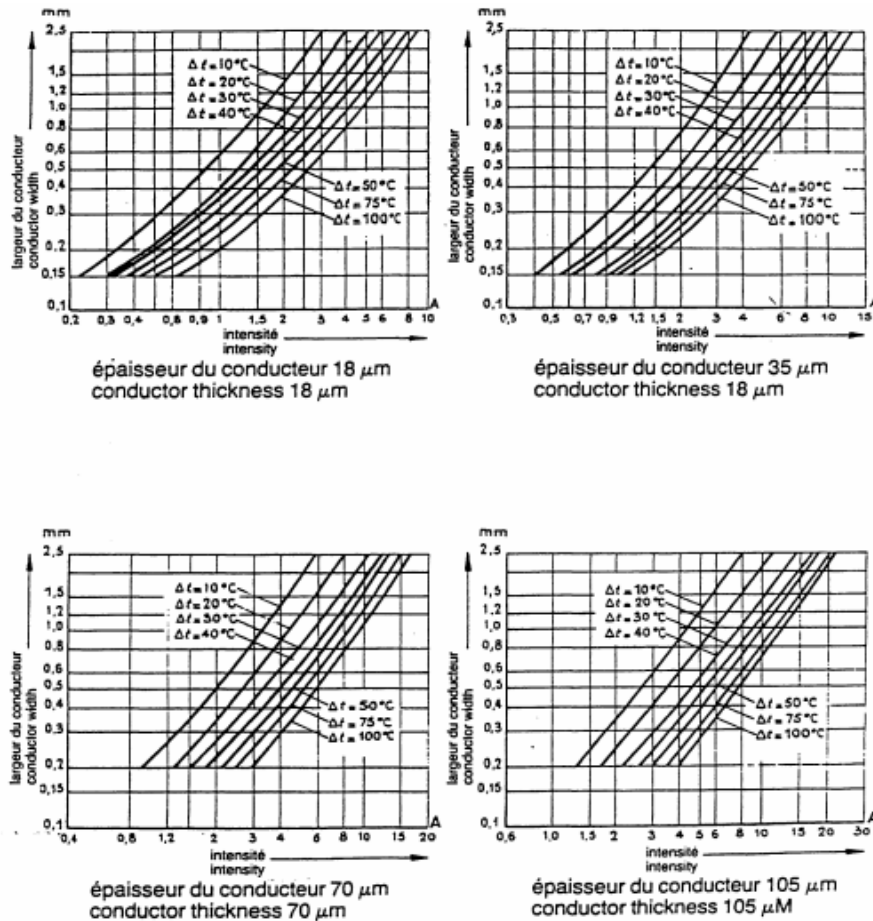


fig. 5 élévation de température
en fonction de l'intensité
increasing temperature/current

Remarque : Le fait de doubler l'épaisseur du cuivre ne permet pas de diviser par deux la largeur de la piste. En effet, pour la même section et la même quantité de chaleur produite, la surface d'échange avec le support est plus faible, donc l'évacuation des calories moins efficace d'où élévation de température plus importante

3. Capacité et inductance entre deux pistes

La capacité et l'inductance entre deux pistes parallèles provoquent des couplages qui ont pour résultat de reproduire sur une piste les informations qui circulent sur l'autre piste. C'est le phénomène de "diaphonie". Ce phénomène peut provoquer le mélange des conversations sur des lignes par effet de proximité. Au niveau de l'électronique industrielle, il y aura des erreurs d'adresse, d'information et des réactions d'une fonction sur l'autre.

a) - La Capacité parasite peut être calculée par la relation classique :

$$C = 8.85 \varepsilon_r \frac{S}{e} * 10^{-12} \text{ Farads}$$

C = capacité en Farads (F)

S = surface des pistes en regard (m^2)

e = espacement des pistes (m)

ε_r = permittivité relative de l'isolant , (voir NCF 93 711, fiche particulière de la matière considérée)

En général, $\varepsilon_r \leq 5$. Elle se fait particulièrement sentir entre les pistes parallèles sur les couches différentes, car la surface en regard peut devenir importante.

b) L'Inductance est toujours présente sur deux pistes parallèles rapprochées, qu'elles soient sur la même face ou sur deux couches différentes. Le mode de calcul étant relativement complexe, il est pratique d'utiliser les graphiques existants publiés dans le guide UTE C 93 703 (Union Technique de l'Electricité).

II.3.2 Paramètres mécaniques et thermiques

1. Adhérence des pistes

L'adhérence d'un conducteur à son support dépend d'un grand nombre de facteurs parmi lesquels se trouve la surface de contact cuivre/support. Cette force d'adhérence est diminuée à chaque opération thermique, (traitements de surfusion, étamage soudure, cuisson de sérigraphie, etc.). La perte d'adhérence peut être telle que la force qui maintient la piste en place n'est plus suffisante. Dans ce cas, la piste se décolle de son support, même avec un effort très faible, (par exemple retouches au fer à souder, dilatation du cuivre lors de l'étamage). Pour éviter ce problème, il est conseillé d'augmenter dans la mesure des possibilités la largeur des pistes.

2. Adhérence des pastilles

Le problème est le même pour les pastilles. En effet, quand un trou est percé dans une pastille, il reste une couronne de cuivre autour du trou, et c'est cette plage de cuivre qui lie la pastille au support. La force d'arrachement d'une pastille est souvent spécifiée pour un diamètre donné mais il n'y a pas ici de corrélation linéaire entre cette force et la surface par suite des modifications aléatoires apportées au moment du perçage, et tendant à diminuer l'adhérence. Ces modifications sont prépondérantes sur des pastilles de faible ϕ et négligeables sur les pastilles de grand ϕ . On cherchera donc à utiliser des pastilles à grande surface de contact, soit un certain rapport ϕ -pastille / ϕ -trou ou encore l'utilisation de pastilles carrées ayant le même encombrement en x et y qu'une pastille ronde, mais offrant une plus grande surface de jonction au support.

3. Surface de cuivre importante, plan de masse

Lorsqu'il est nécessaire d'établir un plan de masse électrique, il est logique de laisser une grande surface de cuivre. Cette méthode est parfaitement valable mais à condition de prévoir un quadrillage de cette surface. Cette configuration ne modifie pas les phénomènes électriques mais elle est avantageuse au point de vue thermomécanique. En effet, si la température de la plaque augmente de façon importante au cours du procédé de fabrication,

la dilatation d'une grande surface de cuivre exerce une contrainte mécanique sur la matière isolante. Cette contrainte provoque une déformation qui se traduit par l'obtention d'une plaque voilée, (flèche, torsion). Ce défaut peut se produire pendant la surfusion, l'étamage, la soudure, la cuisson de sérigraphie. Quand la plaque est striée, les manques de métal à l'intérieur de la surface se présentent comme des joints de dilatation et réduisent considérablement les déformations. Cette technique offre un avantage supplémentaire: chaque surface sans cuivre est un point stable pour l'accrochage du vernis épargne soudure, point très intéressant quand l'épargne est réalisée sur une plaque recouverte d'étain-plomb électrolytique, lequel fond lors de la soudure.

4. Freins thermiques

Quand le procédé de fabrication comporte un système de soudure par méthode simultanée, (bain ou vague par exemple), certaines précautions doivent être prises pour faciliter la prise de soudure sur les pastilles de la face composants. La brasure qui arrive à cet endroit vient de la face inférieure en passant à travers le trou où elle se refroidit. Par conséquent, lors de l'arrivée de la goutte sur la pastille supérieure, sa réserve calorifique est fortement diminuée et l'opération de soudage est compromise si la pastille demande beaucoup de calories. Il faut alors prévoir sur la face éléments, à la conception, des pastilles s'échauffant facilement, donc présentant une faible masse métallique. La solution est simple, il suffit de diminuer le diamètre des pastilles et de les séparer des grosses pistes en établissant une fine liaison pastille piste.

Dans le cas d'un plan de masse réalisé sur la face éléments, le trou ne doit pas être placé en pleine zone cuivrée. Il faut dégager une pastille dans cette surface cuivrée et la relier à la masse par un petit pont de cuivre. On obtient ainsi autour de la pastille une zone de faible conductibilité thermique que l'on appelle "frein thermique". Cette zone permet un échauffement rapide de la pastille donc une soudure aisée.

II.3.3 Critères de fabrication et normes

1. Précision et classes de gravure

Nous avons vu que les paramètres électriques et mécaniques imposent certaines configurations géométriques du tracé de l'impression conductrice : position des trous, largeur et isolement des pistes, diamètre des pastilles. Ces paramètres doivent être respectés pendant les opérations de fabrication du circuit, et on doit les retrouver sur la carte gravée car c'est à ce moment qu'ils deviennent opérationnels. A cet effet les cartes imprimées ont été classées selon les caractéristiques de gravure afin d'obtenir un système cohérent des dimensions des divers paramètres. Les cinq classes établies servent de guide à l'étude d'un circuit et à sa fabrication. Nous donnons, ici, en exemple, un tableau récapitulatif des dimensions.

Critères d'appartenance à une classe Valeurs de conception	Classes					
	1 -	2 -	3 -	4 -	5 -	6 - (2)
Epaisseur totale du cuivre sur faces (μm)	105	105	105	70	50	35
Valeurs nominales maximales sur couches internes	105	105	70	35	35	17,5
	0,80	0,50	0,31	0,21	0,15	0,12
Espacement minimal (mm) - entre conducteurs, - entre conducteur et pastille ou plage, - entre pastilles d'interconnexion, entre plages	0,68	0,50	0,31	0,21	0,15	0,12
Différence minimale entre le diamètre (mm) (1) : - d'une pastille d'un trou d'insertion sur une face et celui du trou fini : * trous non métallisés * trous métallisés - d'une pastille d'un trou d'interconnexion (via) sur une face et celui du trou	1,57 1,19	1,13 0,78	0,90 0,60 0,45	0,49 0,34	0,39 0,24	0,35 0,20
(1) Ces valeurs sont applicables aux cartes simple face (trou non métallisé seulement) et aux cartes double face; pour les cartes multicouches, voir annexe B (2) La classe 6 est donnée à titre prospectif						

2. Sens et forme des pistes

La disposition du tracé influe beaucoup sur les procédés de fabrication. En réalisant certaines opérations telles que la sérigraphie, l'étamage au rouleau, la soudure, on remarque rapidement que la qualité obtenue est meilleure sur les pistes orientées parallèlement au sens de travail, que l'on appelle "sens machine". Sur le sens travers au sens machine, on rencontre des difficultés pour déposer de façon homogène l'encre de sérigraphie, ou pour réaliser correctement l'étamage et la soudure. (Obtention de gouttes, de court-circuit, démouillage) ... Par conséquent, le concepteur du circuit doit organiser son routage pour obtenir une direction unique des pistes sur la face soudure. Cette direction sera le "sens machine" Sur l'autre face, les pistes seront perpendiculaires aux premières. On n'oubliera pas que les pistes en courbe prennent plus de place sur le circuit que les pistes en segments de droite.

II.3.4 Conception implantation

1. Positionnement des composants

Le point de départ d'une implantation est relativement subjectif ; il n'y a en général pas de raison logique pour commencer par un composant plutôt que par un autre. Les solutions envisagées peuvent cependant influencer directement sur le tracé des pistes en le rendant simple ou compliqué, ainsi que sur l'assemblage des éléments et procédé de fabrication. Chaque schéma électronique ayant des impératifs particuliers, nous ne donnons ici que des conseils généraux:

1. Sur le format de carte choisi, placer d'abord le connecteur. Celui-ci permettra déjà de faire une sélection des composants car on placera au plus près du connecteur "les composants d'interface", c'est-à-dire ceux dont les connexions doivent aller vers d'autres cartes. Les "composants autonomes" seront mis à l'autre bout de la carte.
2. Les potentiomètres dont le réglage se fait à l'aide d'un tournevis parallèlement à carte, seront placés en bord de carte afin qu'aucun autre composant ne s'oppose au réglage et du côté donnant accès à la carte quand elle sera dans son rack.
3. Les composants sont implantés parallèles entre eux, ce qui permet de bien les ranger donc de gagner de la place, et si possible ils seront parallèles au bord portant le connecteur, cette disposition est la plus favorable au passage des pistes vers la zone du connecteur, (Fig. 6 page 10). On remarque que cette configuration conditionne le sens de passage des pistes sur la face soudures.

4. Les composants polarisés sont orientés dans le même sens ce. qui diminue les hésitations et risques d'erreur à l'insertion.
5. Lorsque la place disponible est très réduite, il est possible de monter debout les petits composants ce qui autorise une grande densité de pose. Cela nécessite cependant de grandes précautions afin d'éviter les court-circuits entre les fils verticaux. L'insertion devient délicate.
6. Certains composants ayant des effets de proximité, il est nécessaire de les implanter en veillant à dégager autour d'eux une zone de sécurité. Par exemple, une résistance de puissance produisant de la chaleur ne sera pas placée à proximité d'un composant sensible aux variations de température (un condensateur électrolytique par exemple). Il en est de même pour le rayonnement électromagnétique d'un bobinage ou l'effet de masse d'une grosse pièce métallique.
7. Il faut également considérer que deux composants ne doivent pas se toucher sous peine d'établir des courants de fuite voir des court-circuits à l'usage.
8. Pour les mêmes raisons et pour une plus grande facilité de nettoyage après soudure il est conseillé d'éviter le contact des corps des composants avec la face supérieure du circuit imprimé (pieds de lavage).

2. Positionnement des trous

Au début de cet exposé, nous avons parlé du rôle des trous. Leur positionnement est conditionné par la géométrie des composants. En règle générale tous les composants ont leurs broches à un entre axe de 2,54 mm, multiple ou sous-multiple. Pour positionner les axes des trous d'un composant il suffira alors de repérer les points d'intersection d'une grille au pas de 2,54 mm (grille fondamentale). Ce guide de positions est très pratique et précis. C'est cette même grille qui servira de référence aux contrôles dimensionnels ultérieurs. La précision de position des trous est primordiale, car s'ils ne sont pas correctement placés, les composants ne peuvent plus être insérés normalement sans détériorations. A ce titre, on peut travailler selon les tolérances spécifiées sur le tableau des classes de fabrication. En ce qui concerne les composants à sortie axiale, comme les diodes, les résistances, certains condensateurs, l'entre axe des pattes est défini par le pliage de celles-ci. A ce sujet, on doit se rappeler qu'il ne faut pas plier au ras du corps de l'élément, cela risquerait de casser la jonction patte/corps et de donner ultérieurement un faux contact. La distance de pliage se calcule en fonction de chaque élément (Fig. 7 page 10), mais il faut arrondir la distance au pas supérieur pour que les deux pattes concordent avec la grille de référence. Il est intéressant d'aligner les trous, car moins il y aura de dispersion, plus l'opération de perçage sera simple et rapide. En général, les composants sont fixés mécaniquement par le joint de soudure aux connexions, si leurs poids n'excèdent pas 7 grammes par connexion ; sinon il faut prévoir une vraie fixation mécanique par collage ou vis et collier par exemple. Mais dans ce cas, il faudra placer un trou supplémentaire à la conception.

3. Routage des pistes

Cette opération consiste à chercher le meilleur passage pour une piste circulant parmi les autres pistes et pastilles. C'est à ce niveau de la conception que le travail est le plus délicat car si les trous sont plus ou moins imposés par les critères des composants comme nous l'avons vu, les pistes, elles, doivent seulement remplir leur fonction de liaison. A ce titre, le concepteur les fait passer où bon lui semble. Néanmoins, il se rendra très vite compte que certaines solutions posent des problèmes de passage pour d'autres pistes, ce qui oblige à recommencer

un autre routage, ou même de déplacer un composant. A ce stade du travail, il faut être très prudent et il est judicieux de n'implanter que quelques composants et d'établir leurs interconnexions. On avancera ensuite de proche en proche par petits groupes de composants ou fonction. Pour faciliter le travail, quelques conseils sont intéressants à suivre.

1. L'impression conductrice doit être répartie le plus uniformément possible à la surface de la carte.
2. Quand les pistes sont des segments de droites, il est possible de les ranger et de gagner de la place qui fait souvent défaut. On multiplie ainsi les possibilités de passage.
3. Les jonctions piste/pastille se font toujours selon l'axe du trou. On évitera de raccorder plus de deux pistes sur la même pastille, ainsi que les jonctions de pistes à angle aigu.
4. Les pistes d'une largeur supérieure à 10 mm seront striées.
5. Si le circuit étudié est une double face, réalisé avec métallisation électrolytique, on essaiera d'équilibrer les surfaces conductrices de chaque côté de la carte.
6. Cette disposition favorise l'obtention de dépôts d'épaisseurs identiques sur les 2 côtés de la plaque.
7. Toujours dans le cas d'un circuit double faces, pour simplifier la recherche du routage en évitant les croisements, il faut définir sur chaque face un sens privilégié de parcours. Habituellement les pistes vont au connecteur sur la face soudure, et dans le sens perpendiculaire sur la face éléments.

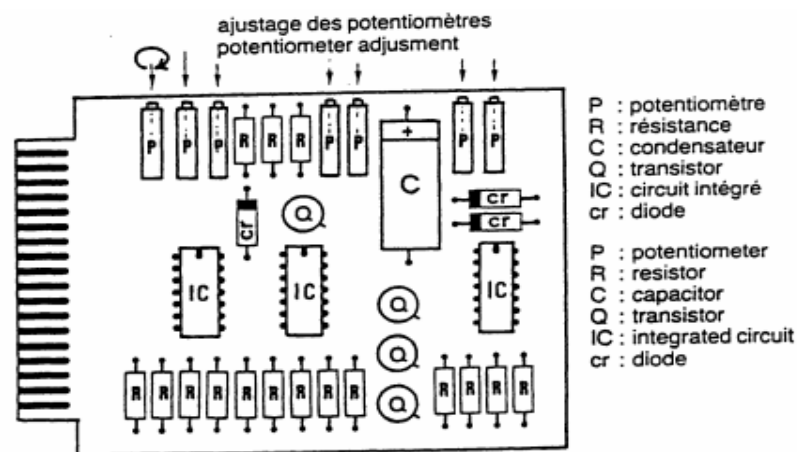


Figure 6 : exemple d'implantation

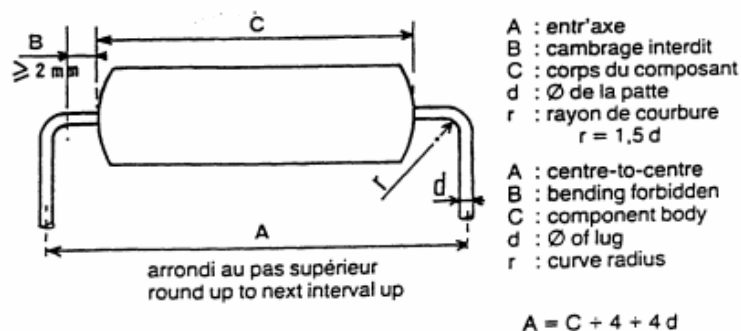


Figure 7 : cambrage