

CONCEPTION DES CIRCUITS IMPRIMÉS

Par D. MULLER (Sté IFTEC)

Cet exposé est consacré à l'étude des moyens et des méthodes permettant de définir et d'obtenir les dessins correspondants au futur circuit imprimé. Le point de départ est le schéma de principe de la fonction électronique à mettre en carte.

Le but est le dessin des éléments de la carte de circuit imprimé, soit:

- le tracé des pistes pour chaque face,
- le repérage des composants,
- les zones d'épargne soudure,
- les plans d'usinage.

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.

1) 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.

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). 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 ou le circuit est bien décontaminé après fabrication, et parfaitement sec, il est possible d'appliquer la relation suivante:

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

Ris = 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, Rit, 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 page 10. Les mesures de Ris et de Rit y sont faites sous une tension de 500 V $\pm$ 50 V à l'aide d'un galvanomètre branché selon la figure 3.

Le graphique de la figure 4 page 11 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 mm, ce qui donne une tension disruptive de 1 500 V en 50 Hz. ou de 2 500 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 1W = 1J/s et que 1J = 1/4,18 calories. Donc, à chaque seconde, il se produit $0,24 R * i^2$ 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 page 12). 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/mm² de section dans du cuivre de 35 μ m d'épaisseur provoque un échauffement de 8 °C par rapport à l'ambiante. Des abaques pratiques permettent de faire un choix rapide de la largeur (Fig. 5).

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 :

$$C = 8,85 \text{ Er } \frac{S}{e} * 10^{-12} \text{ Farads}$$

C = capacité en Farads (F)

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

e = espacement des pistes (m)

Er = permittivité relative de l'isolant (voir NCF 93 711, fiche particulière de la matière considérée). En général, $Er \leq 5$.

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). Pour information, nous donnons en Fig. 6 page 14 un graphique permettant de déterminer l'inductance de deux conducteurs parallèles dans une certaine fourchette des possibilités habituelles.

c) - Utilisation rationnelle des inductances et capacités parasites. Dans certains cas bien précis, il est possible d'utiliser avec avantage ces capacités parasites et inductances. C'est la technique des lignes à microrubans ou microstrip et strip-line. Nous n'en donnons ici que le principe à titre d'information, (Fig. 7 page 15). Un composant reçoit l'information en provenance d'un autre composant, et cette information circule sur une piste active par rapport à une autre piste de référence qui est généralement la masse électrique.

L'ensemble piste active - piste de référence forme une ligne de transmission. Vis-à-vis de l'information à transporter, cette ligne de transmission présente des caractéristiques électriques dont nous avons déjà parlé: la capacité et l'inductance L . Sans faire de cours d'électronique, nous rappelons seulement que L est affectée d'une résistance propre et C également, ce qui fait que L et C sont des impédances complexes comportant une valeur réelle plus une valeur imaginaire.

L'ensemble de ces termes permet de définir l'impédance caractéristique Z de la ligne, ce qui est évidemment une valeur complexe dans le cas général, (terme réel + terme imaginaire).

Nous rappelons également que la puissance transmise par une ligne atteint une valeur maximum quand cette ligne présente une impédance caractéristique réelle assimilable à une résistance pure, et égale à celle de la source de l'information et du récepteur, de même que le rendement est maximum et le signal non déformé. Dans ces conditions, on dit que la ligne est adaptée. Ces conditions d'adaptation sont primordiales dans le transfert des fréquences élevées et des impulsions rapides.

L'utilisation rationnelle des éléments L et C consiste donc à déterminer la géométrie des pistes de sorte

II CONDITIONS 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.

Chaque matière de C.I. possède une caractéristique d'adhérence par unité de surface (comme un collage) ; cette caractéristique est mentionnée dans les feuilles particulières de la Norme NCF 93 711.

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.

Remarque: Pour les pistes de largeur inférieure à 0,8 mm, l'adhérence peut être très inférieure à la norme par suite des imperfections locales de la jonction cuivre support.

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.

Remarque: Lorsque les trous sont métallisés, la paroi métallique du trou apporte une force d'ancrage supérieure pour une pastille donnée. Dans ce cas on peut donc réduire à l'extrême le diamètre des pastilles, mais il ne faut pas oublier les défauts de centrage trou pastille qui doivent malgré tout laisser une couronne continue pour la soudure.

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 (voir Fig 8). Cette configuration ne modifie pas les phénomènes électriques mais elle est avantageuse au point de vue thermo-mécanique. 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'acorchage 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 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 (Fig. 9 page 16).

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.

5-) - Morsure latérale

Pendant la gravure du cuivre il se produit toujours une attaque de pistes par leur flan, ce qui a pour résultat de réduire la largeur de la piste (Fig. 10 page 16).

Cette réduction doit être prise en compte lors de la conception du circuit et obligatoirement sur des pistes fines. En général, on admet une diminution de la largeur de la piste égale à une épaisseur de cuivre, soit par exemple 0,35/10 mm pour un cuivre de 35µm.

III- CRITÈRES DE FABRICATION – NORMES.

1-) - Précision - 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. Les tableaux consignant les paramètres de chaque classe présentent trois Positions :

conception, clichés, cartes terminées, ce qui permet de tenir compte des altérations possibles sur les dimensions entre un dessin de conception, un cliché et la carte terminée. Nous donnons, ici, en exemple, un tableau récapitulatif des dimensions.

caractéristiques	Classe 1			Classe 2			Classe 3			Classe 4			Classe 5		
	Con	Cl	C-U	Con	Cl	C-U	Con	Cl	C-U	Con	Cl	C-U	Con	Cl	C-U
Largeur minimale des conducteurs	0,80	0,70	0,55	0,50	0,45	0,35	0,40	0,36	0,30	0,25	0,22	0,17	0,15	0,13	0,10
Espacement minimal entre conducteurs et/ou pastilles	0,70	0,60	0,45	0,50	0,45	0,35	0,35	0,31	0,25	0,23	0,20	0,17	0,20	0,18	0,15
Différence minimale entre ϕ pastille et ϕ trou															
trous non métallisés	1,60			1,20			0,90			0,90			0,90		
trous métallisés	1,20			0,80			0,64			0,47			0,40		
Largeur radiale minimale															
trous non métallisés															
trous métallisés			0,20			0,20			0,20			0,20			0,20
avec ou sans revêtement			0,05			0,05			0,05			0,05			0,05
Tolérance de superposition d'une face par rapport à l'autre (dessin modèle ou cliché)		0,15			0,10			0,07			0,03			0,03	
Tolérance de la position des pastilles par rapport à la grille (dessin modèle ou cliché)		0,20			0,10			0,05			0,02			0,02	

"Con" = conception ; "Cl" = clichés ; "C-U" = cartes usinées.

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-circuits, 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, (voir § IV 3).

On n'oubliera pas que les pistes en courbe prennent plus de place sur le circuit que les pistes en segments de droite.

- Nourrices pour connecteurs, pilotage, repère du contour

a> Nourrices

Le revêtement des contacts d'un connecteur par une épaisseur de métal inaltérable (or en général), est réalisé après gravure. Si le procédé de dépôt est une électrolyse, chaque élément de contact du connecteur doit être relié à la borne négative du générateur électrique. Mais le circuit étant gravé, il n'existe plus le

plan de cuivre permettant la liaison électrique.

Le concepteur doit alors prévoir un système de distribution du courant, ne faisant pas partie du circuit mais reliant entre-eux les contacts du connecteur, ce dispositif s'appelle "une nourrice" (Fig. 11 page 16).

Elle est placée à l'extérieur du format de détournement de la carte et de ce fait disparaîtra lors de l'usinage final. Très souvent cette nourrice fait tout le tour du format, procurant un cadre métallique ce qui permet d'établir le contact électrique par n'importe quel bord de la carte, aussi bien, dans les opérations de métallisation des trous, d'étamage électrolytique que de traitement du connecteur. Ce cadre est suffisamment large pour véhiculer le courant nécessaire sans perturbations, et il est positionné immédiatement au bord du format de travail.

b) - Pilotage

Afin de permettre la superposition correcte des clichés d'une face sur l'autre ou des différentes couches il est nécessaire de prévoir les points de repère en concordance sur chaque image de chaque couche, (pistes, épargne soudure et marquage des composants). Ces points repères sont en général implantés à l'extérieur du contour de la carte (Fig. 11). Lors de la fabrication du circuit, ils seront toujours percés en début de gamme et serviront à positionner les clichés pour les reports-images, ainsi qu'à placer et maintenir les plaques sur les machines (perçage, sérigraphie).

Pour éviter les risques d'inversion, il est conseillé de placer 3 repères dissymétriques. Habituellement 2 peuvent suffire en prenant quelques précautions supplémentaires, (par exemple, rogner un coin pour définir un sens). La norme NFC 93 703 définit la tolérance de position du système de référence.

c) - Repère du contour

La matérialisation du contour de la carte n'est utile que sur une seule face, et seulement pour indiquer les changements de direction. Les repères du contour sont disposés extérieurement au format réel afin de disparaître lors de l'usinage final. (Fig. 12). Pour éviter les risques de conserver un liseré de cuivre sur le bord de la carte après détournement (risque de court-circuit !), il ne faut pas matérialiser les segments de droite entre les changements de direction.

- Zones interdites

Sur une carte terminée, aucune partie de l'impression conductrice ne doit se trouver à moins de 1,27 mm de toute fixation mécanique. Aucun trou n'est situé à moins d'une épaisseur de stratifié du bord de la carte. Aucun corps de composant n'est à moins de 1,27 mm du bord ou d'une glissière ni à moins de 2,54 mm du passage d'un outil.

Si une insertion automatique est envisagée, il faut prévoir autour des composants une zone libre pour le passage de la tête d'insertion.

CONCEPTION IMPLANTATION

- 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 (voir Fig.13 page 13), 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. 13). 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 spécifiés sur le tableau des classes de fabrication, (voir § III-1). 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. 14 page 17), 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'excède 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, (voir § II-3).
- 5) Si le circuit étudié est un double faces, 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 (Fig. 15).

- *Cas des multicouches*

Pour la conception d'un circuit multicouches, tous les paramètres déjà cités sont valables, cependant. Il faut y faire particulièrement attention car ils sont amplifiés par le rapprochement des couches.

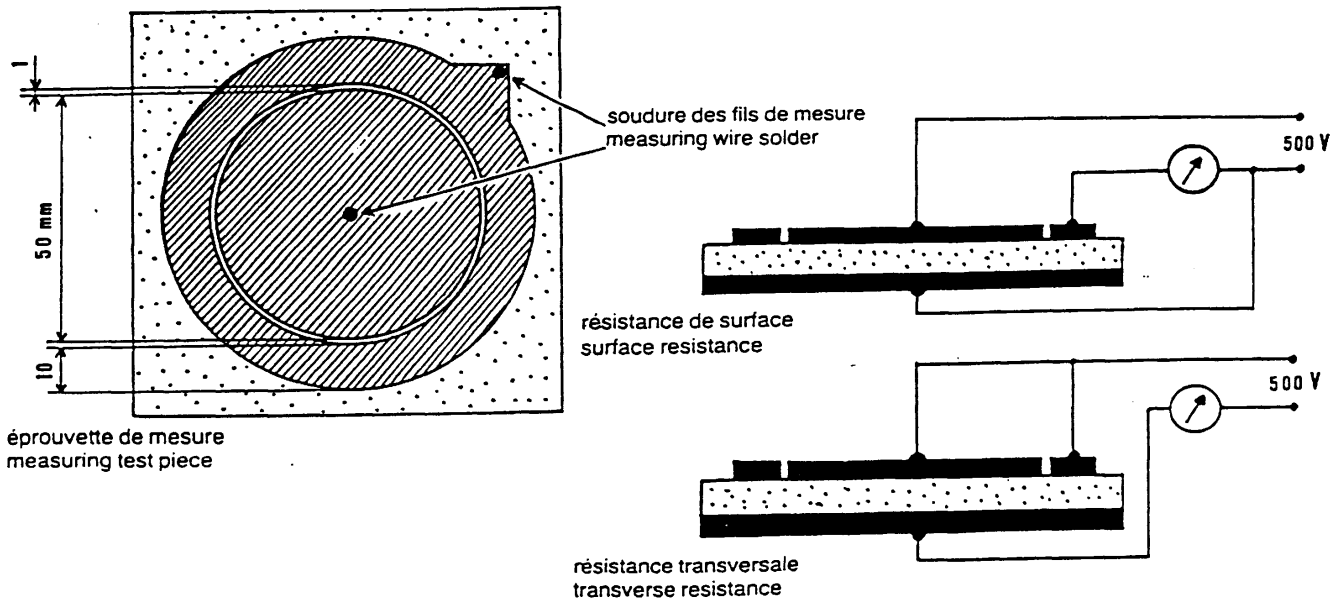
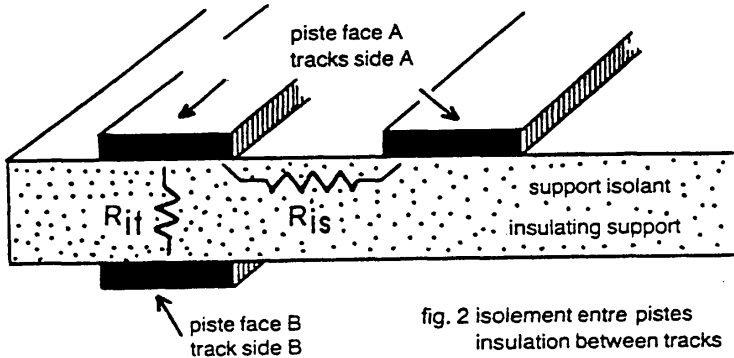
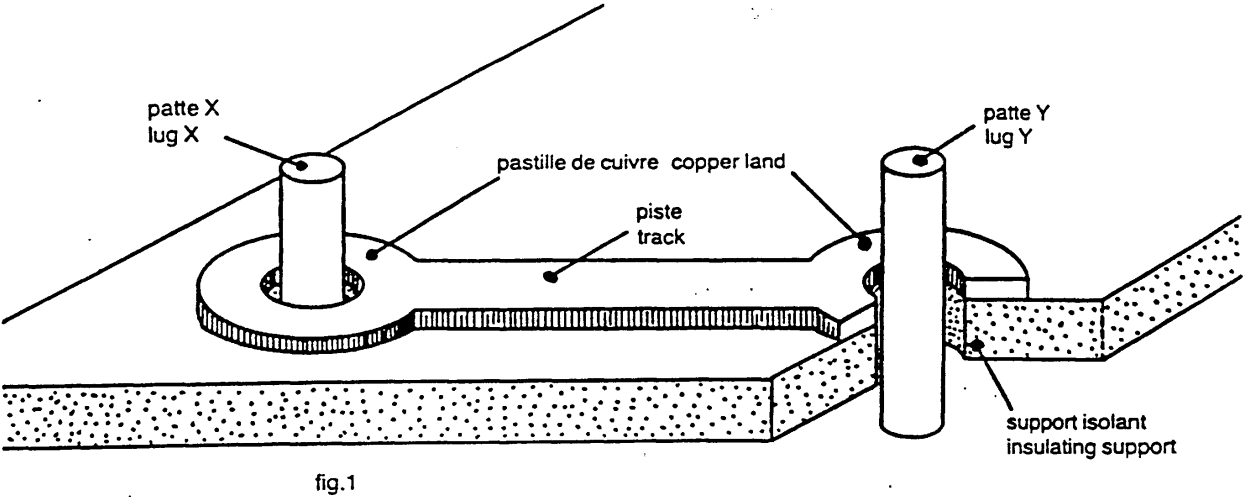
Cette proximité augmente les valeurs des capacités parasites ainsi que le couplage. Quelques critères supplémentaires sont à prendre en compte.

Pour augmenter la surface de raccordement électrique entre une couche interne et les parois du trou métallisé, ces couches sont généralement en cuivre de 70 μm d'épaisseur. Ceci diminue d'ailleurs le risque de rupture d'une piste lors du pressage. Selon le repérage choisi il, peut être nécessaire de disposer des "freins de fluage" sur le pourtour de la carte afin d'avoir un remplissage complet par la résine.

Les pions de pilotage ne doivent pas être distants de plus de 150 mm pour éviter le glissement des couches internes pendant le fluage. Sur les circuits de grandes dimensions, on placera des pions à l'intérieur du format définitif pour les mêmes raisons.

Pour des raisons de fiabilité et d'intervention, les couches internes porteront les fonctions électroniques classiques (plan de masse, blindage, alimentations, fonctions simples de câblage) et les couches extérieures seront réservées aux fonctions délicates permettant ainsi d'éventuelles interventions.

Chaque couche mentionne en clair son N° d'ordre. Les numéros sont positionnés dans la case correspondante d'une petite échelle à l'intérieur de la carte, ils doivent tous être lisibles du même côté de la carte terminée. Le numéro correspondant au plan de masse sera gravé en négatif (Fig. 6 page 13), et les autres cases sur l'échelle de cette couche seront entièrement gravées afin de permettre la lecture des autres numéros par transparence. Ce dispositif permet de repérer rapidement une couche et surtout d'éviter des erreurs d'ordre lors de l'empilage des couches pour le pressage.



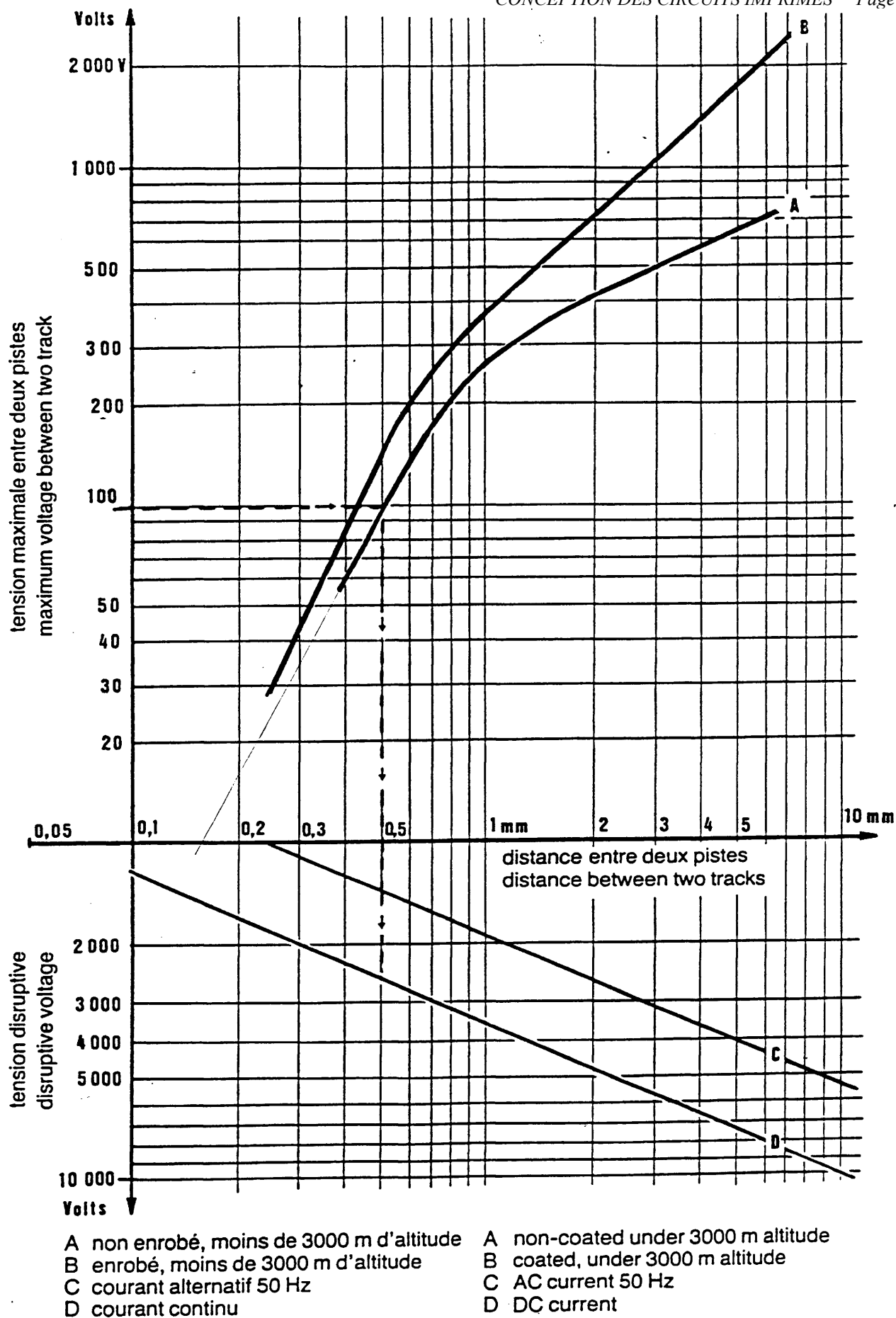
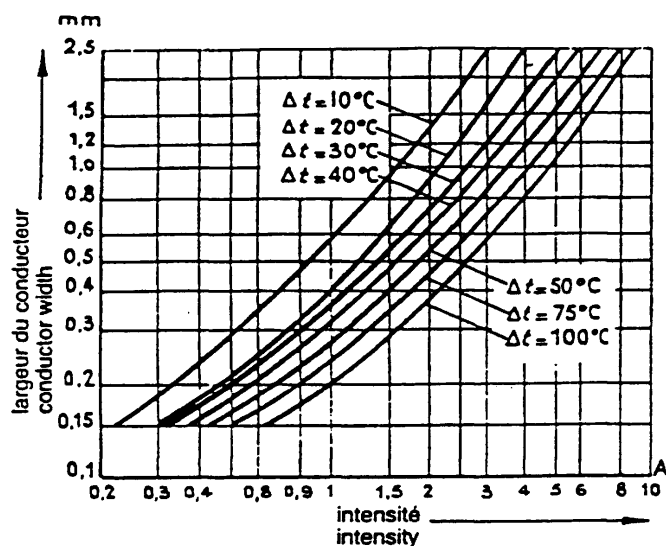
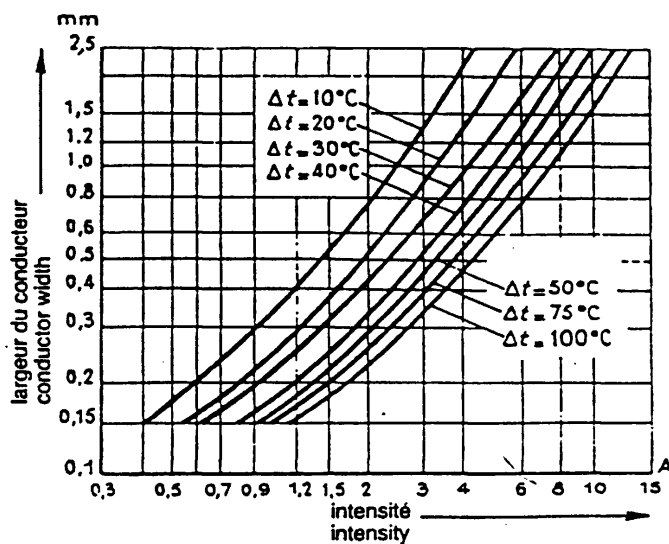


Fig. 4' espacement des pistes
conductor track spacing

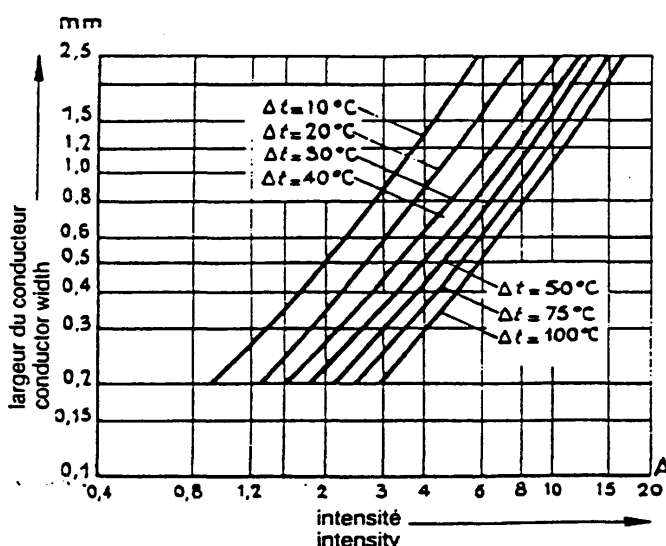
(coated = vernis)



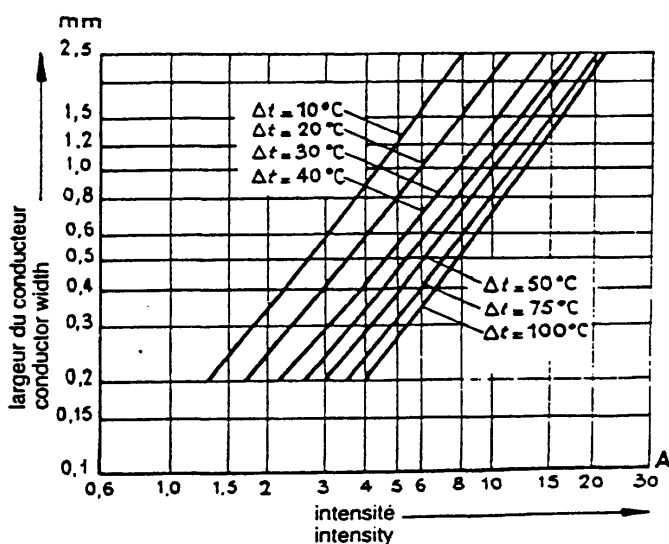
épaisseur du conducteur 18 μm
conductor thickness 18 μm



épaisseur du conducteur 35 μm
conductor thickness 18 μm

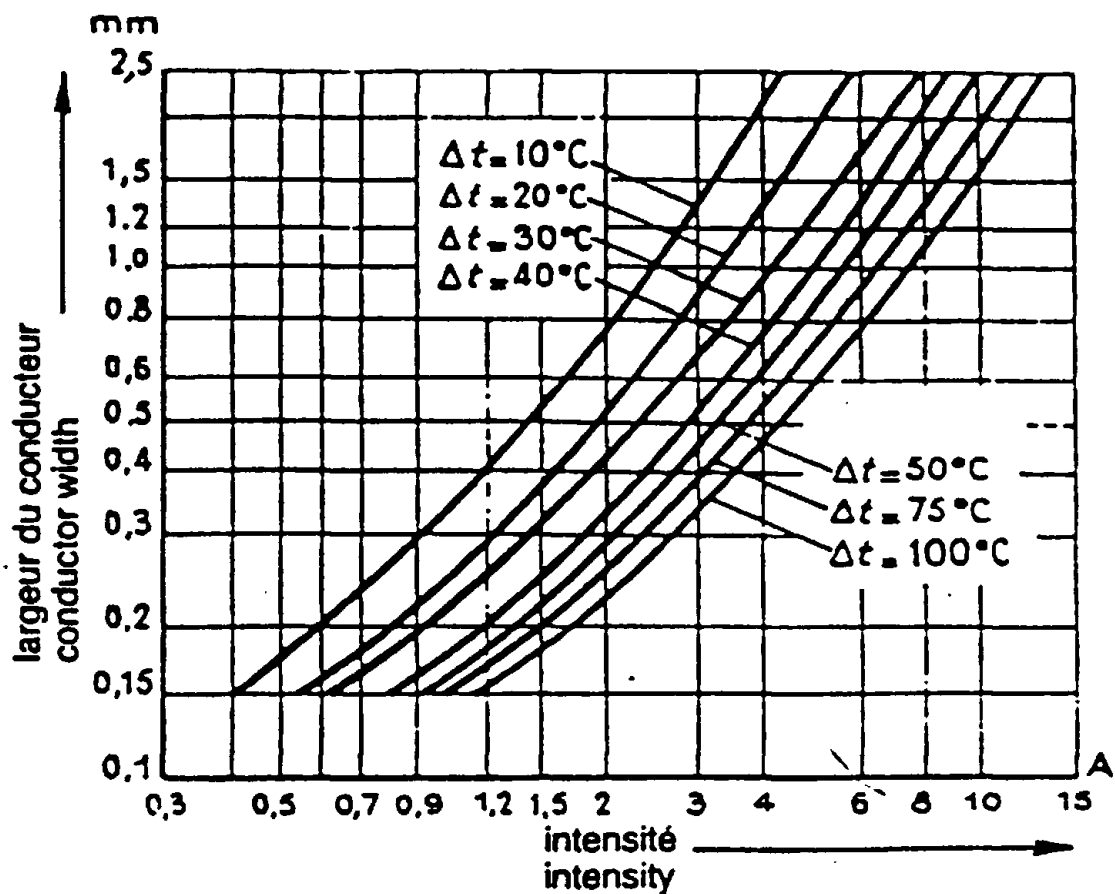


épaisseur du conducteur 70 μm
conductor thickness 70 μm

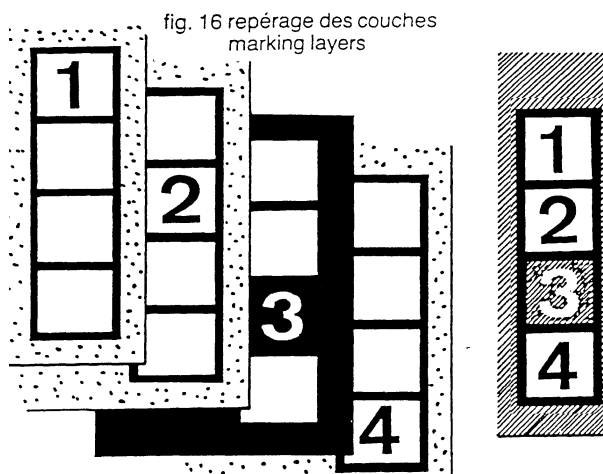
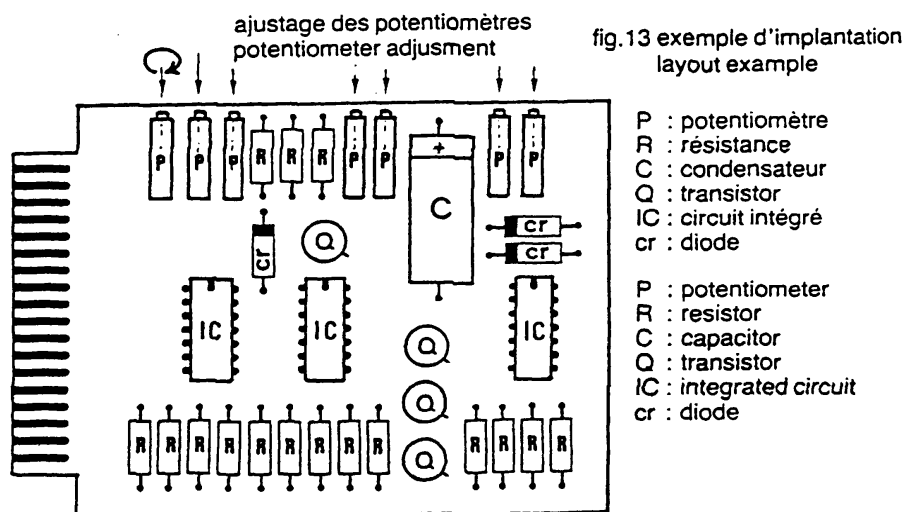


épaisseur du conducteur 105 μm
conductor thickness 105 μm

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



épaisseur du conducteur $35\ \mu\text{m}$



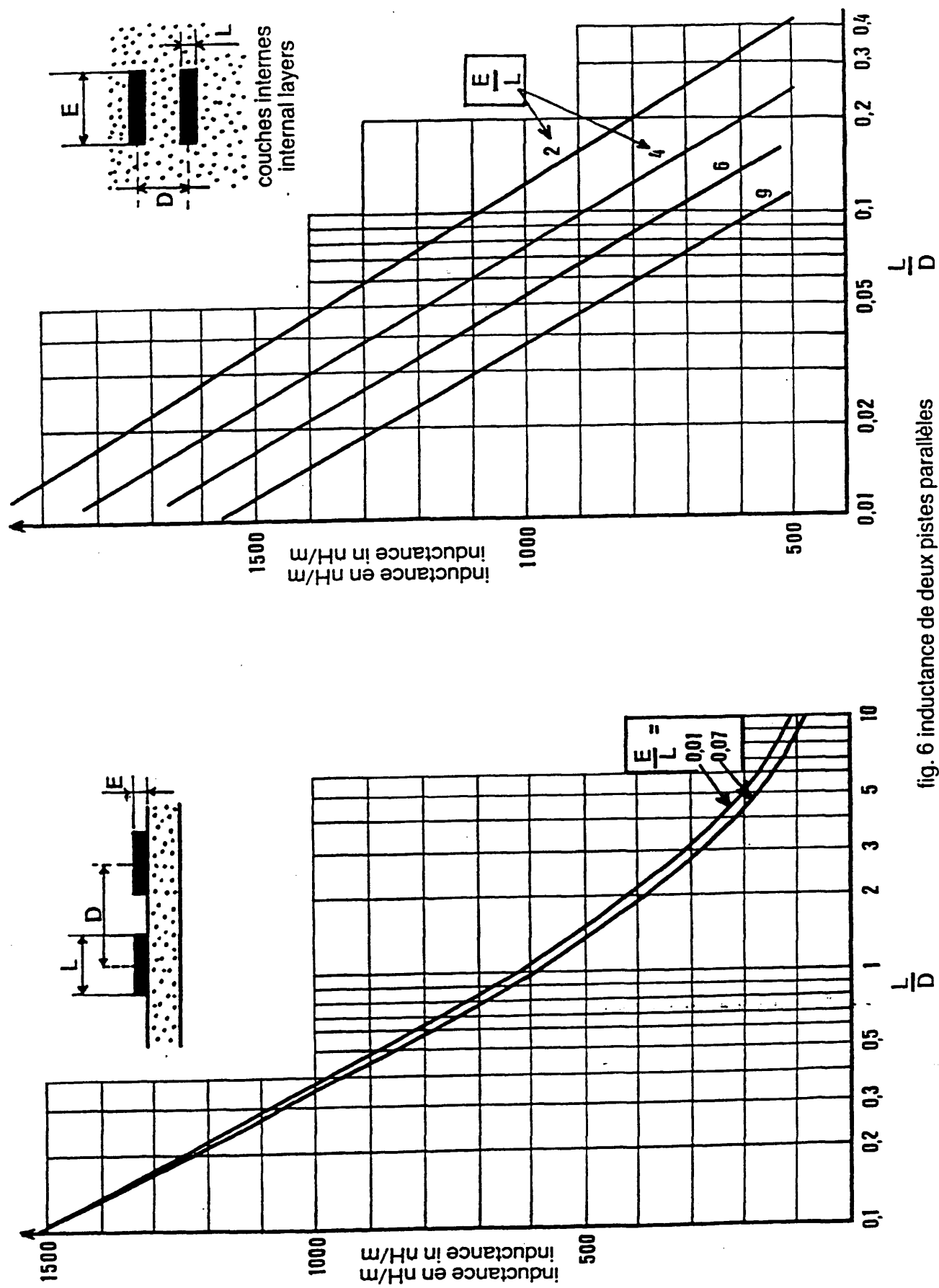


fig. 6 inductance de deux pistes parallèles
inductance of two parallel tracks

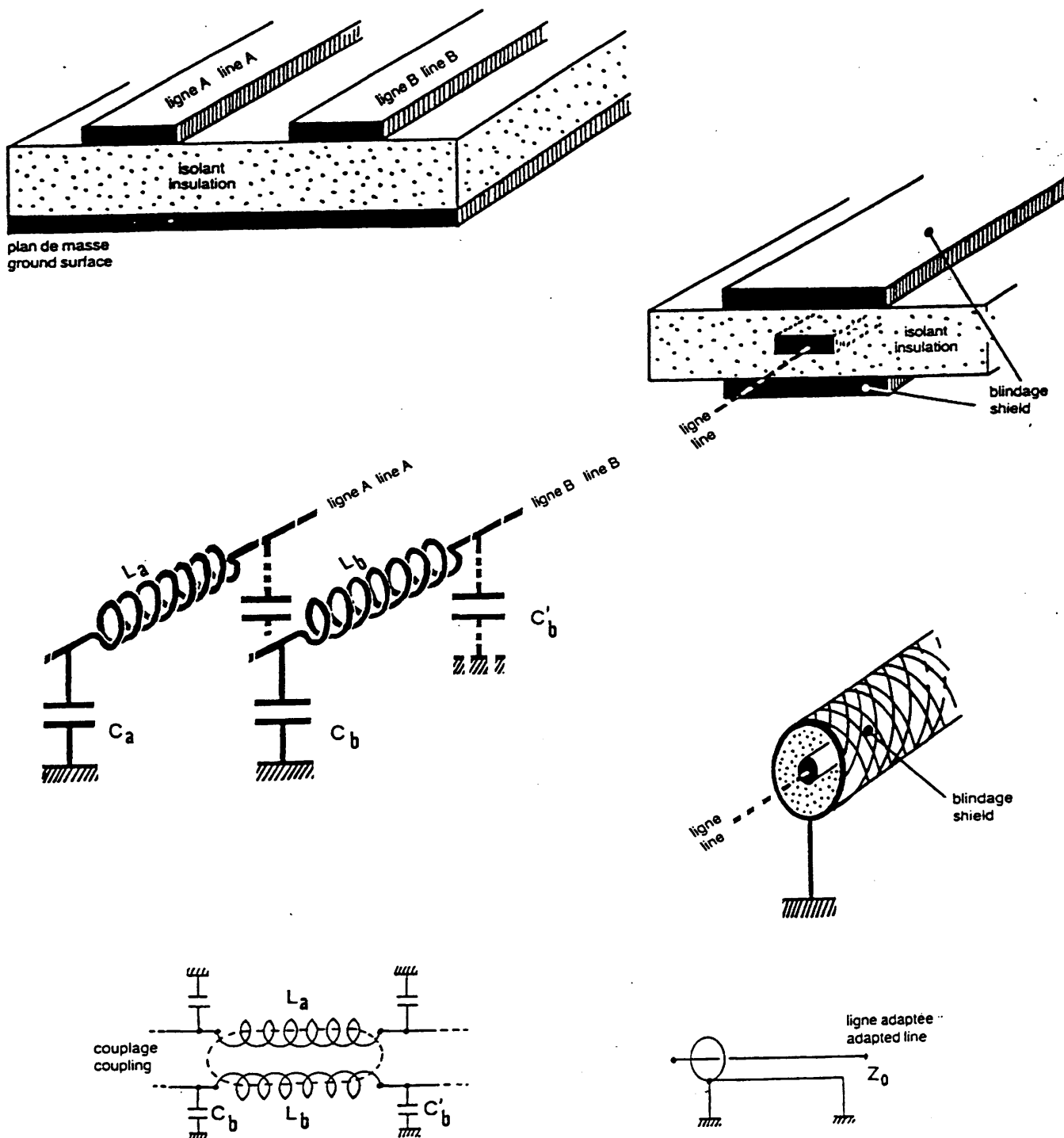


fig. 7 équivalences : géométrie du tracé/caractéristiques électriques
equivalents: layout geometry/electrical features

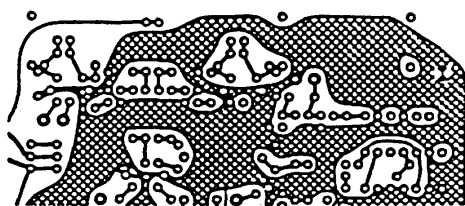
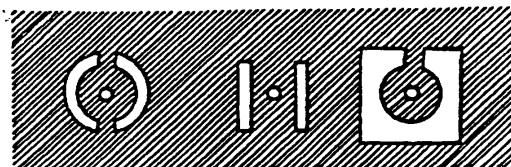
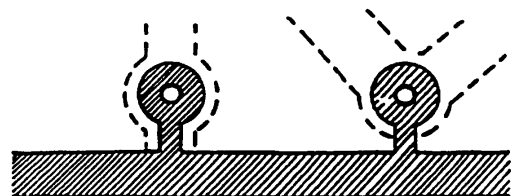


fig. 8 plan de masse strié (exemple)
ribbed ground plan (example)



a) sur plan de masse
a) on ground plan



b) sur piste large face éléments
b) on wide conductor track,
component side

fig. 9 freins thermiques
thermic dampers

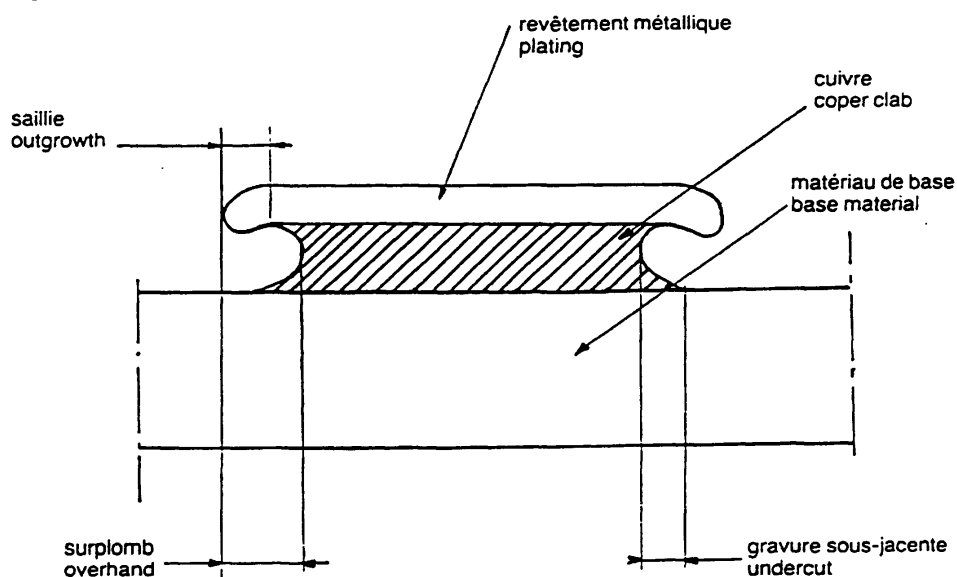


fig. 10 gravure sous-jacente et saillie
undercut and outgrowth

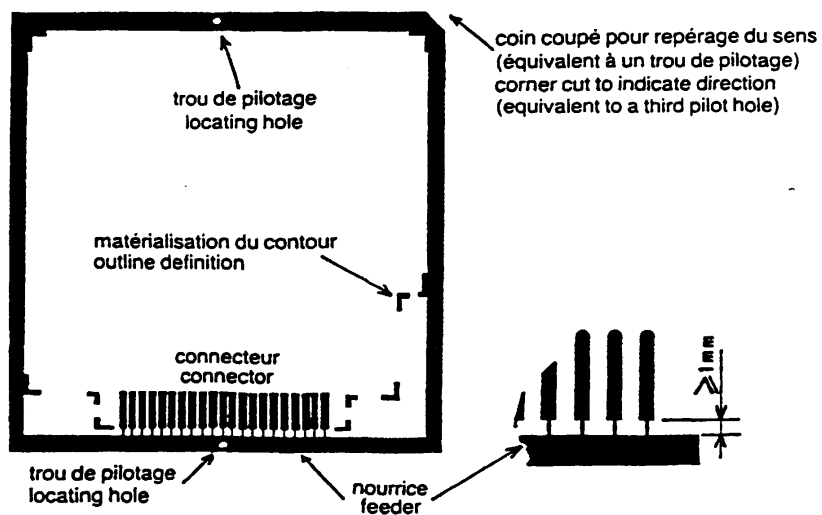
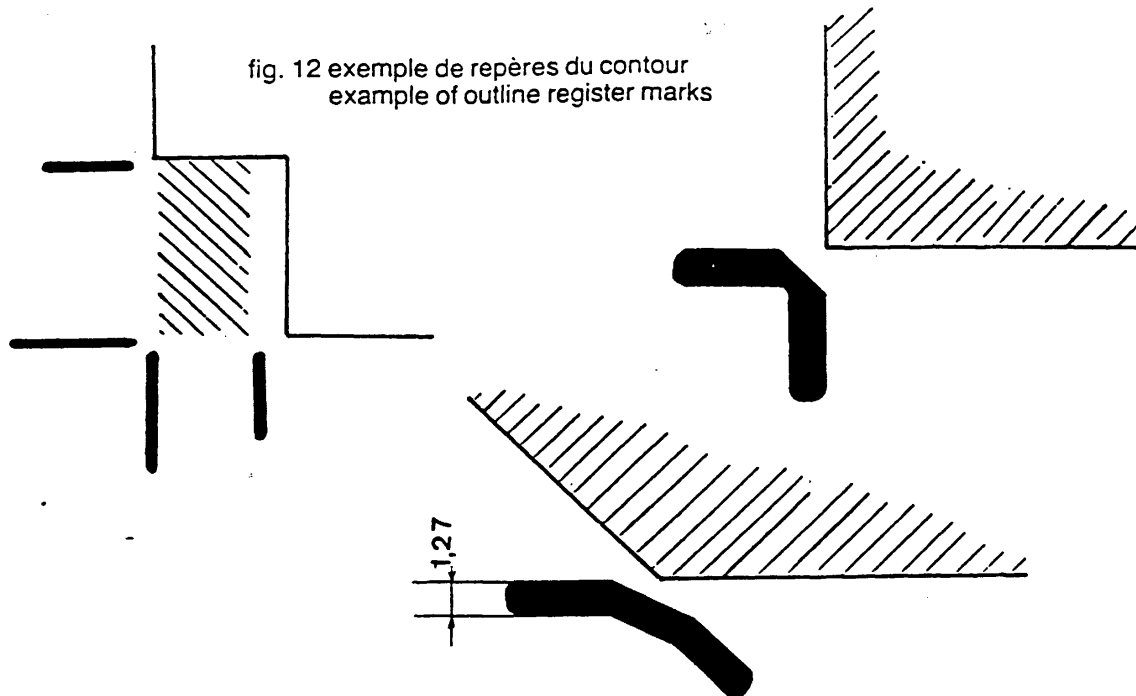


fig. 11 nourrice et pilotage
feeder and locating

fig. 12 exemple de repères du contour
example of outline register marks



ajustage des potentiomètres
potentiometer adjustment

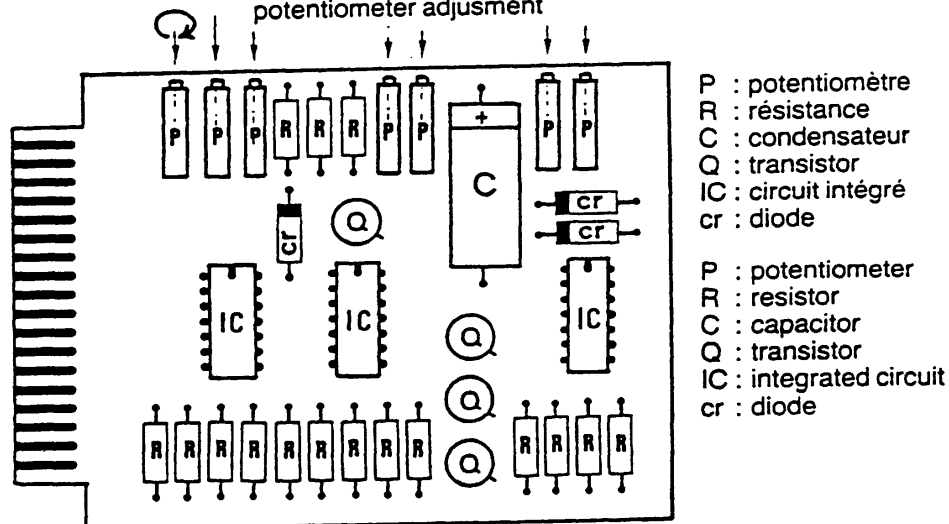
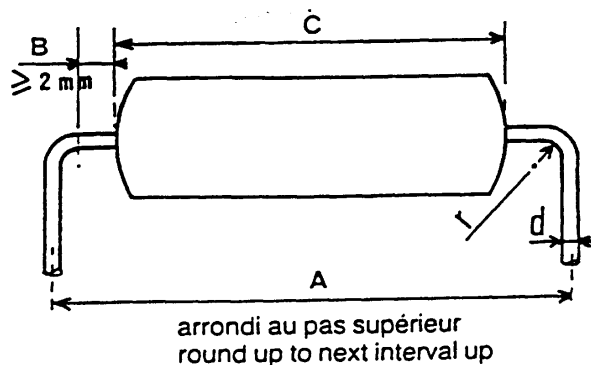


fig.13 exemple d'implantation
layout example



- A : entr'axe
B : cambrage interdit
C : corps du composant
d : Ø de la patte
r : rayon de courbure
 $r = 1,5 d$
- A : centre-to-centre
B : bending forbidden
C : component body
d : Ø of lug
r : curve radius

$$A = C + 4 + 4 d$$

fig.14 cambrage
bending