

MANUELS DE L'AMATEUR ÉLECTRONICIEN

RÉALISATION DE CIRCUITS IMPRIMÉS



PAR M. J. HUGHES ET M. A. COLWELL
traduit de l'anglais par B. Loubieres

Eyrolles

EDITEUR-PARIS

RETRONIK.FR

M. J. HUGHES
M. A. COLWELL

RÉALISATION DE CIRCUITS IMPRIMÉS

EYROLLES

E

ÉDITIONS EYROLLES

ALLAEYS - Cours de télévision - 864 p., 1976

BARNA et PORAT - Initiation aux minicalculateurs et microprocesseurs
116 p., 1977 (coll. Pratique de l'informatique)

BARRY - Schémas d'électricité - 304 p., 1978

MARSTON - 110 Études pratiques de l'amplificateur opérationnel -
144 p., 1978 (coll. E.E.A.)

MONTI - Mémento d'électronique et de radiotechnique :

1. Tubes électroniques - 72 p., 1974
3. Alimentation - 60 p., 1976
6. Propagation et antennes - 70 p., 1975

PIRAUX - Dictionnaire français-anglais des termes relatifs à l'électro-
nique et l'électrotechnique - 208 p., 1978

- Dictionnaire anglais-français des termes relatifs à l'électro-
nique et l'électrotechnique - 400 p., 1978

SALMIECH (de) - Les magnétophones à cassettes - 176 p., 1975

ÉDITIONS EYROLLES

MANUELS DE L'AMATEUR ELECTRONICIEN

RÉALISATION DE CIRCUITS IMPRIMÉS

par

Michael John HUGHES et Morris A. COLWELL

traduit de l'anglais

par Bernard LOUBIERES

ÉDITIONS EYROLLES
61, bd Saint-Germain - 75015 Paris
1978

RÉALISATION DE CIRCUITS IMPRIMÉS

Dans la série Manuels de l'amateur électronique

EN VENTE aux ÉDITIONS EYROLLES

Étude et réalisation d'ensembles électroniques
par Morris A. COLWELL

Réalisation de circuits électroniques simples
par P.C. GRAHAM

Traduction autorisée de l'ouvrage anglais

Simple circuit building

© Butterworth et Co (Publishers) Ltd. 1976
London 88 Kingsway WC2B 6AB

table des matières

Préface	VII
1. Pourquoi et comment employer les circuits imprimés	3
2. Caractéristiques des matériaux de base	15
3. Projet d'implantation de circuits imprimés	25
4. Traitements chimiques	43
5. Montage des composants	55
6. Techniques de réalisation industrielle	67
7. Circuits préimprimés à usage multiple	75
Index	84

pourquoi et comment employer les circuits imprimés

Bien que cet ouvrage soit consacré à la réalisation et à l'emploi des circuits imprimés en radioélectricité et en électronique, il semble utile d'examiner tout d'abord quelques applications techniques, dont certaines sont évidentes et d'autres moins courantes, avant de montrer comment vous pouvez concevoir les vôtres et les réaliser chez vous.

Les amateurs pensent généralement que les circuits imprimés ont simplement remplacé les méthodes traditionnelles de câblage ; en réalité, ce matériau est utilisé pour de nombreuses raisons aussi bien esthétiques que purement fonctionnelles. Une multitude d'applications pratiques ont vu le jour, qu'il eût été auparavant très difficile, voire impossible de mettre en œuvre en câblage traditionnel.

Le but essentiel visé par le circuit imprimé est de conduire les courants et signaux électriques au sein d'une mince couche de cuivre, adhérent fortement à un matériau support isolant, désigné parfois sous l'appellation de substrat. Ce substrat est muni, lors de sa fabrication, d'une feuille de cuivre laminée le couvrant entièrement, qui devra ultérieurement être partiellement gravée ou éliminée, afin d'obtenir un dessin prédéterminé correspondant aux connexions d'un circuit électrique ou à toute autre application requise. La gravure est généralement réalisée par traitement au moyen d'un produit *masquant* qui rend le cuivre insensible à l'action des solutions acides utilisées pour attaquer les zones devant être éliminées.

Le terme circuit *imprimé* provient de la méthode originelle de fabrication, dans laquelle un dessin préimprimé était utilisé en tant que masque, protégeant les parties utiles du circuit imprimé. Les méthodes variées de protection par vernis, largement exploitées pour imprimer des dessins, ne se limitent pas cependant à ce domaine.

Il est évident que les méthodes recourant à l'emploi de la sérigraphie ou de masques usinés de précision ne sont pas à recommander dans le cas de réalisations occasionnelles ou de travaux d'amateurs du fait qu'elles ne sont économiques et efficaces que pour de grandes séries. La facilité de réalisation en très grande quantité de circuits imprimés garantis sans erreur, pourvu que l'implantation ait été réalisée correctement, en constitue l'attrait essentiel du point de vue professionnel et l'amateur peut en tirer profit et s'en inspirer pour ses applications personnelles, ou le développement de prototypes. Le prix de revient modéré des appareils modernes de Radio et de Télévision ainsi que d'autres équipements électroniques repose sur cette méthode d'assemblage. La reproductibilité et la fiabilité d'interconnexion sont importantes, certes, mais le circuit imprimé apporte d'autres avantages.

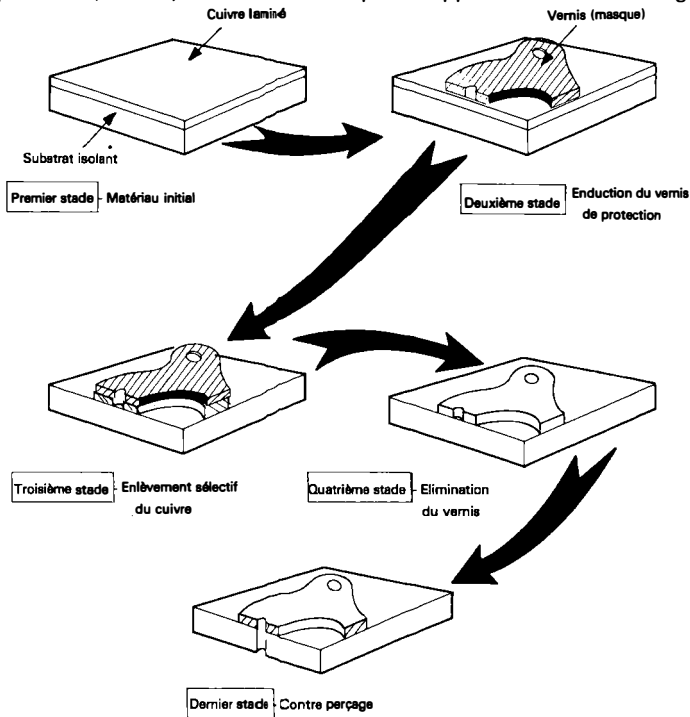
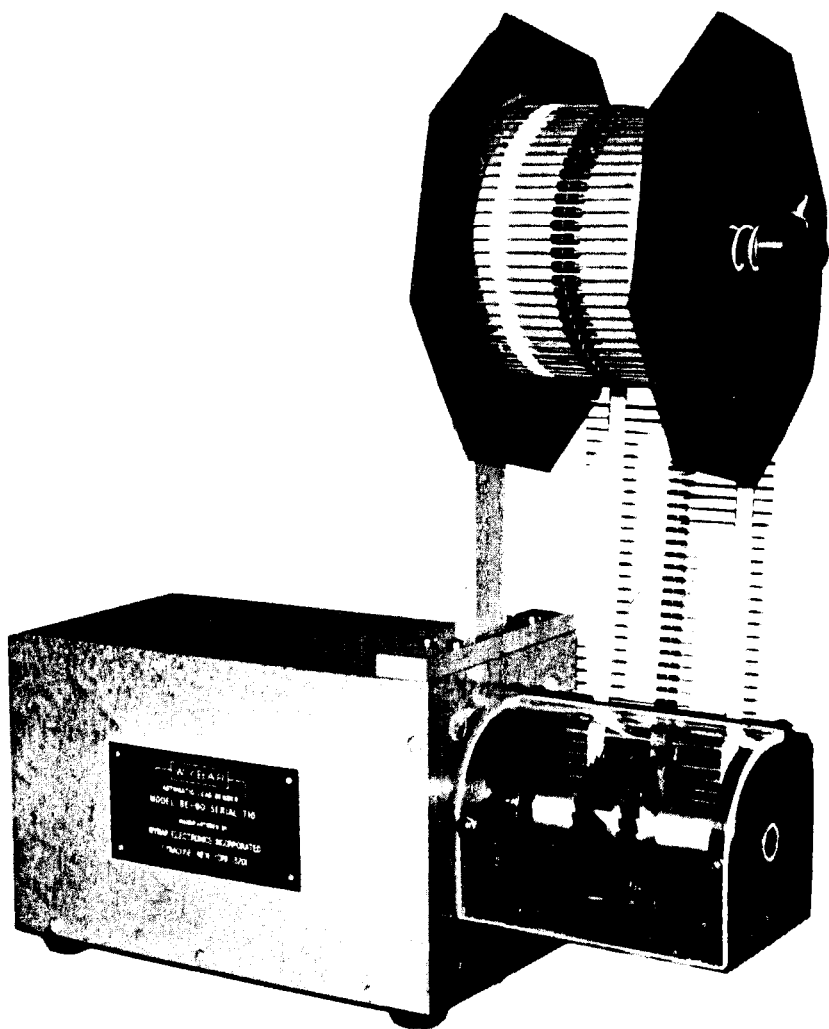


Fig. 1. Cinq étapes dans la fabrication d'un circuit imprimé simple face.



Les composants de petite dimension sont parfois montés en bande comme ci-dessus, de manière à être aisément chargés sur tambour, et fournis ultérieurement de façon automatique à une machine qui les implante et les connecte sur le circuit imprimé (document Eraser International Ltd).

Le circuit imprimé fournit un support idéal sur lequel on peut assembler et maintenir solidement la plupart des composants de petites dimensions (fig. 2), éliminant ainsi les foisonnements ou les plaquettes à cosses peu élégantes, tels qu'on les rencontrait auparavant.

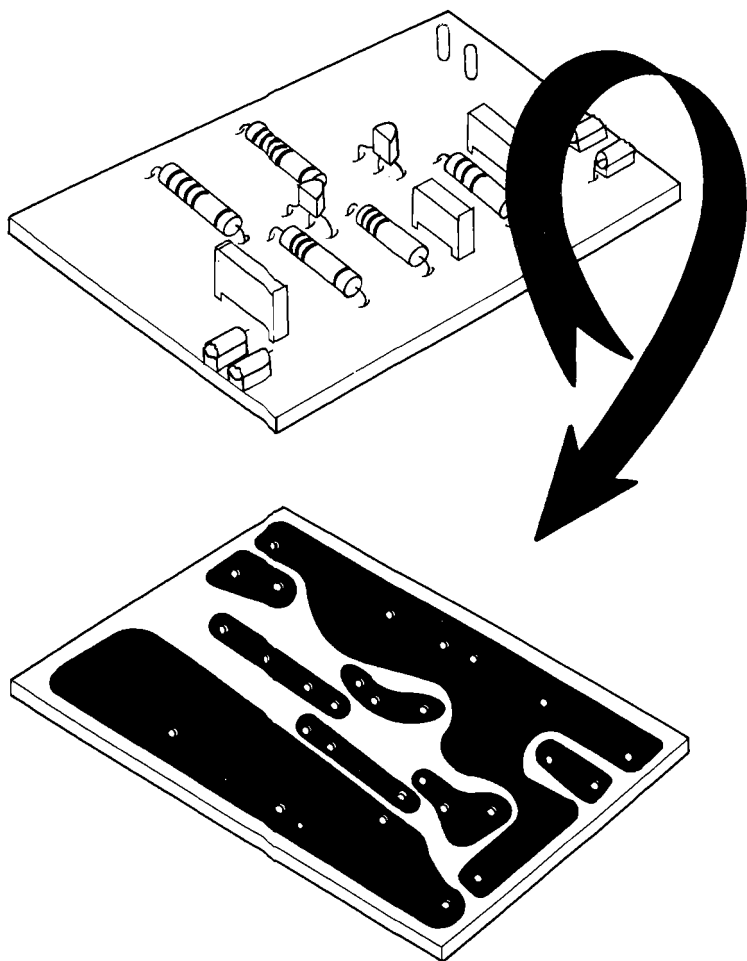


Fig. 2. Comparaison entre l'implantation des composants au recto du circuit et l'aspect de la face cuivrée dans le cas d'un ampli-buffer à deux étages. Remarquer l'inversion du système de perçage apparaissant par retournement. Des circuits de ce degré de complexité peuvent parfaitement être réalisés par des constructeurs débutants, n'ayant encore acquis aucune expérience.

Le câblage bénéficie d'une excellente tenue mécanique et peut être éloigné des composants dissipant des calories, la microphonicité du câblage en haute fréquence peut être éliminée et les rebouclages parasites maîtrisés dans des limites bien définies.

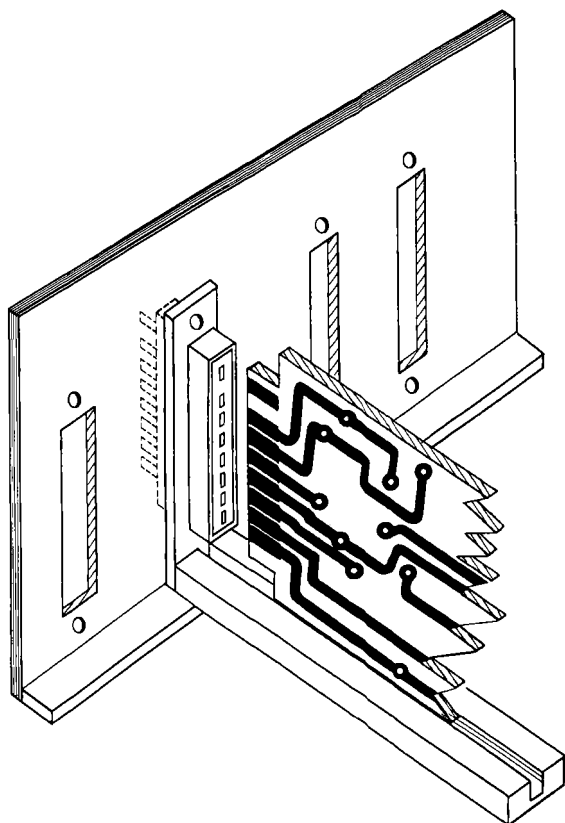


Fig. 3. Montage classique d'un circuit imprimé dans un système modulaire. Des connecteurs de carte multipoints sont fixés sur un « fond de bac » et les cartes sont maintenues par des glissières les guidant pour leur enfichage dans les connecteurs. Le cuivre utilisé pour les contacts au niveau de connecteur est généralement plaqué or de manière à assurer une faible résistance de contact. Des réalisations expérimentales peuvent se dispenser de cette finition.

Du fait que le circuit imprimé comporte un seul niveau plan, — quelquefois appelé monolithique — des techniques de fabrication sophistiquées peuvent être envisagées. Une pratique courante consiste à préassembler les composants au moyen d'une machine entre deux bandes jumelles auto adhésives (ou cartouchière), formant un rouleau. Celui-ci alimente une machine qui coupe automatiquement les queues à la longueur désirée, les plie à l'endroit convenable et les insère sur le circuit imprimé. Ils sont alors soudés par passage à *la vague* sur un bain d'étain.

Le circuit est maintenu à très faible distance du bain de soudure, qui vient effleurer la face cuivrée du circuit tout le long d'une *vague* créée par entraînement mécanique du bain. Les extrémités des composants, de par leur proéminence, viennent plonger dans la vague et par *mouillabilité* la soudure circuit-queue de composant est réalisée. Le flux de soudure en excès retombe dans le bain, se décollant complètement des zones isolantes entre pistes conductrices. Aucune contamination pouvant engendrer des courts circuits ne peut ainsi résider entre les pistes.

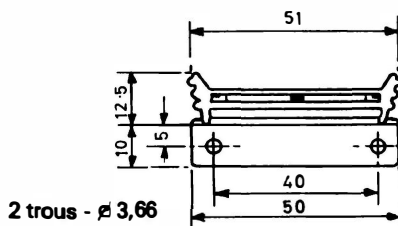
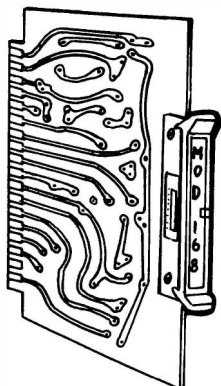
Sans parler pour l'instant des circuits intégrés, la densité d'implantation des composants avec un tel système est considérablement améliorée par rapport aux techniques antérieures. Au moyen d'impressions sérigraphiées ou par transfert de lettres auto-adhésives effectué manuellement sur la face isolante de la carte, la position de chaque composant ainsi que son repère alphanumérique peuvent être marqués clairement, ce qui simplifie considérablement les contrôles et la maintenance ; les schémas d'implantation, faisant l'objet de publications, sont obtenus très facilement.

Les systèmes complexes peuvent être scindés en fonctions composées de circuits logiques, constituant des « blocs » fonctionnels. S'il est nécessaire, des blocs fonctionnellement indépendants peuvent être répartis sur des cartes distinctes, ou disposés en groupes indépendants sur une ou deux cartes. L'emploi de connecteurs multipoints disposés sur la tranche de la carte autorise l'insertion par glissières, ces dernières étant montées sur un châssis qui porte des peignes de câblage fixes constitués par les queues des embases des connecteurs femelles (fig.3). La facilité d'accès ainsi offerte permet au technicien le remplacement rapide d'une carte, et le dépannage de la carte en avarie sans mise hors service de l'équipement concerné.

On fabrique aujourd'hui des câblages imprimés sur film flexible de mylar. Une quinzaine de pistes peuvent être supportées par une feuille de mylar dont la largeur n'excède pas 2,5 cm et dont l'épaisseur ne dépasse pas quelques dixièmes de millimètre. Plusieurs de ces feuilles

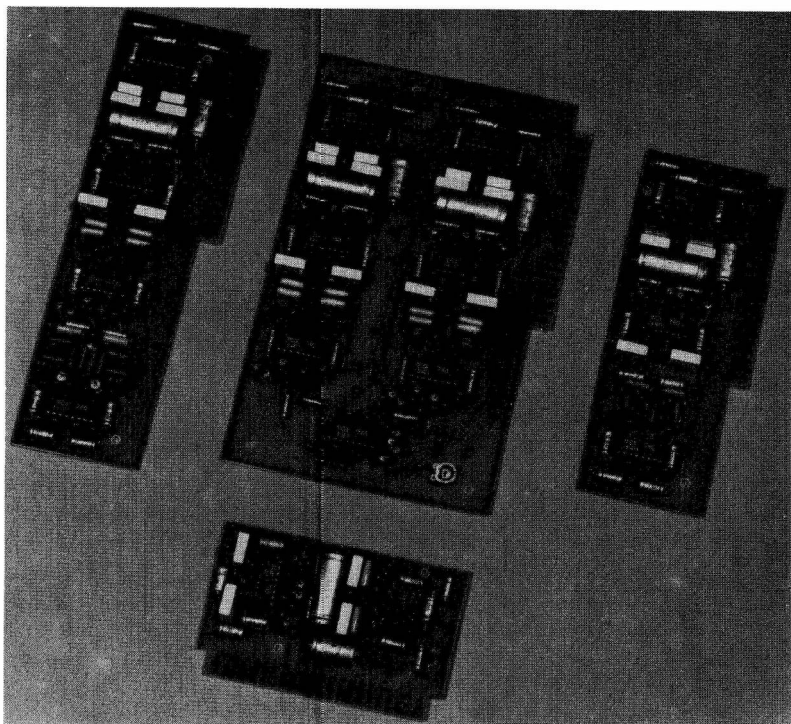


Lorsque plusieurs circuits imprimés sont utilisés dans un système dit « modulaire » il est alors opportun de réaliser une tenue mécanique efficace de ces circuits compatible avec une maintenance aisée, au moyen d'un bac à glissières: La photo représente une vue de dessus partielle du Système Critchley (glissières supérieures). Des dimensions diverses de circuits imprimés sont permises et un raccordement par connecteur de carte ou par limande peut être mis en œuvre (Document Critchley Ltd).



Des poignées peuvent être montées sur les cartes pour en faciliter l'extraction.

peuvent être empilées, et les différentes couches peuvent former des arborescences dans des directions quelconques par pliage, ou dérivation vers différents connecteurs.



Un exemple de réalisation commerciale de circuits imprimés. Ces cartes comportent les circuits électroniques entrant dans la réalisation de matériels acoustiques stéréophoniques et quadriphoniques. On remarquera la visibilité des pistes de cuivre à travers le substrat, constitué dans ce cas de résine epoxy chargée de fibre de verre (encore appelé verre-epoxy). Ces circuits sont connectés sur leur bord droit au moyen de contacts plaqués or, ce qui permet leur extraction facile pour maintenance ou remplacement éventuel. Les pistes d'alimentation peuvent être aperçues à la périphérie et dans la partie médiane des cartes. On notera de même le montage des composants suivant l'une ou l'autre de deux directions perpendiculaires, ce qui améliore la maintenance et la localisation de ces composants. (Document Philips).

Matériaux de base laminés avant leur pressage à chaud (Document Bakelite Xylonite Ltd.).

Pour l'utilisateur, la qualité essentielle du circuit imprimé est son rôle de support mécanique pour les composants de petites dimensions. Le besoin se fait moins sentir de concevoir une architecture mécanique longue à réaliser, sauf peut-être pour le coffret devant contenir les circuits.

La plupart des schémas de conception relativement simple se transposent très aisément en une implantation de circuit imprimé ; l'effort de réflexion nécessaire à effectuer cette traduction révèle à coup sûr toutes les erreurs qui ne manqueraient pas de se glisser dans un câblage fil à fil. Le produit fini est généralement d'aspect plus soigné, de dimensions réduites, et ne manque pas d'esthétique.

Dans de nombreux cas, les circuits peuvent être découpés en groupes de composants assurant une fonction particulière (étages d'un amplificateur par exemple) ; des circuits préimprimés standards de genres variés sont disponibles sur le marché, dont le but est de faciliter ces regroupements. Ils sont très commodes pour réaliser des montages expérimentaux ou des maquettes ; l'amateur dans ce cas n'a pas le souci de créer un circuit imprimé particulier. Ces circuits standards sont munis de pistes de cuivre formant un réseau prédéterminé, conçu pour répondre à des règles d'interconnexion usuelles de transistors ou de circuits intégrés. Bien que ces circuits standards soient très utiles dans leur genre, ils ne peuvent être comparés en fiabilité et en durabilité avec les circuits imprimés gravés dans un but spécifique.

Les amateurs s'intéressant aux schémas publiés dans les revues spécialisées peuvent s'apercevoir que les réalisations proposées font de plus en plus intervenir les circuits imprimés, ce qui résulte surtout de la complexité des schémas proposés, ou du fait que les circuits intégrés exigent un tel support. Dans la plupart des cas, il est presque impensable de tenter une réalisation excluant l'emploi des circuits imprimés ; ce livre a été spécialement conçu pour aider l'amateur à travers les obstacles qui souvent le dissuadent de les utiliser et à fortiori de les fabriquer. Les chapitres qui suivent décriront plusieurs méthodes de réalisation, allant de la technique élémentaire jusqu'au traitement photomécanique le plus compliqué, et détailleront plus spécialement celles qui sont à la portée de l'amateur occasionnel ou de l'expérimentateur construisant un prototype.

Inconvénients

Toute médaille ayant son revers, les circuits imprimés présentent dans certains cas des inconvénients que l'on ne saurait ignorer. L'intensité électrique admissible dans les pistes de cuivre est limitée par leur épaisseur et leur largeur. Une fois les composants mis en place, leur enlèvement peut parfois être très difficile, surtout dans le cas où ils

comportent un grand nombre de connexions. Pour s'affranchir de cette difficulté, il est prudent d'utiliser des embases pour maintenir ces composants, même si le prix de revient s'en ressent ; le gain de temps sera appréciable lors de la mise au point ou de la maintenance et surtout l'on conservera son calme.

La difficulté qui reste probablement la plus inquiétante aux yeux d'un débutant est l'interdiction de croiser les pistes. Les circuits électroniques réalisés en composants discrets utilisent le *pontage* d'une piste à une autre au moyen des composants eux-mêmes, et parfois en établissant des liaisons par fil isolé rapporté. Avec un peu d'expérience et une étude approfondie du problème posé, il devient relativement aisé de réaliser un circuit imprimé complet sans faire appel à des liaisons rapportées sur le côté *composants* du circuit.

Dans le cas des ensembles électroniques dits « logiques » utilisant des circuits intégrés, il n'est pas commode d'utiliser le boîtier pour *ponter* les pistes, à cause de la proximité des pattes des circuits intégrés ; on est donc obligé fréquemment de rajouter des fils de liaison, qui peuvent nuire à l'aspect du produit terminé ; ceci constitue aussi une source d'erreurs, et un surcroît de travail non négligeable.

Dans l'industrie, cette difficulté a été surmontée par l'emploi de circuits imprimés « double face » sur lesquels le cuivre laminé a été déposé des deux côtés ; deux implantations indépendantes sont alors simultanément gravées sur ces faces. La densité des composants peut être ainsi accrue, particulièrement dans le cas des circuits intégrés, et l'on se passe de liaisons surajoutées. Il est évident que la fabrication doit être soignée, de manière à obtenir la correspondance exacte entre les deux faces du circuit imprimé, c'est la raison pour laquelle les amateurs renoncent à l'emploi de circuits *double face*.

Ces derniers posent d'ailleurs d'autres problèmes ; on a parfois besoin de relier entre elles deux pistes se trouvant de part et d'autre du substrat. Un moyen consiste à percer le substrat, et à garnir la surface du « puits » ainsi créé d'un *flash* électrolytique de cuivre, sur lequel sera accroché un dépôt de cuivre plus important, de manière à établir une continuité électrique à travers le substrat isolant (fig. 4). Un tel circuit est appelé *Carte à trous métallisés*. Cette méthode n'est utilisée que lorsque la fiabilité est assurée (conditions d'environnement favorables). L'avantage essentiel des circuits à trous métallisés consiste en la possibilité de souder à la vague sur les deux faces du circuit.

Une autre méthode, appliquée par certains fabricants, fait intervenir des traversées métalliques, sortes de rivets miniatures. Ils sont introduits dans les trous simplement percés dans le substrat et écrasés fortement de chaque côté de la carte au contact des pistes de cuivre

devant être reliées. Une soudure vient parachever la continuité électrique et, malgré cette opération supplémentaire, la méthode demeure la meilleure du point de vue de la fiabilité.

On peut simplement utiliser les queues des composants eux-mêmes pour relier des pistes de part et d'autre d'un circuit double face. C'est une excellente solution pour l'amateur, mais on ne doit pas oublier qu'elle requiert deux soudures pour chaque traversée du circuit ; comme les queues des composants sont très courtes, une fois que ceux-ci ont été implantés sur le circuit, le flux thermique du fer à souder risque d'atteindre très rapidement le composant et de l'endommager. Une variante efficace consiste à utiliser des plots, qui sont placés dans les trous de liaison et soudés de part et d'autre aux pistes à relier, sans risque de dégradation des composants. Les plots sont ensuite coupés au ras de la soudure. La figure 4 illustre cette façon de procéder.

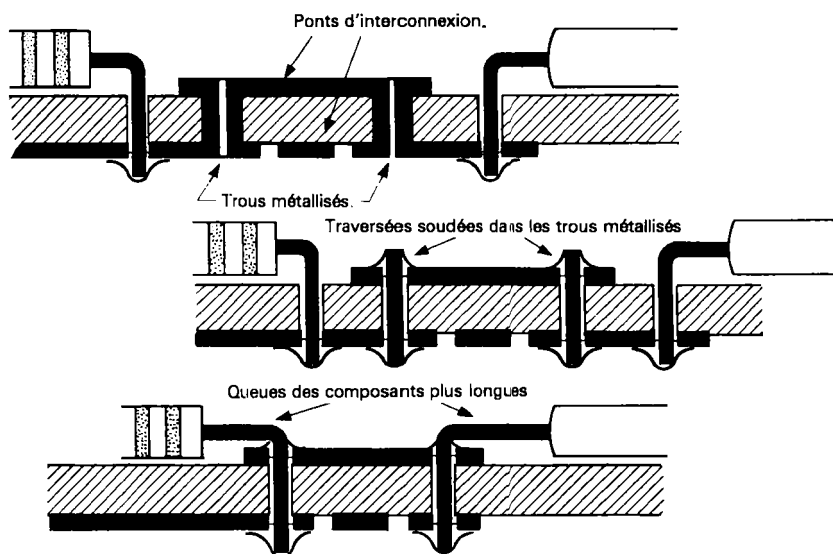


Fig. 4. Trois méthodes pour croiser des pistes au moyen de circuits double face. L'amateur ne peut s'équiper pour réaliser des trous métallisés, et il peut procéder comme indiqué sur le deuxième et le dernier dessin.

On peut être tenté de conclure que les circuits imprimés ont des applications dans un domaine limité ; l'emploi des techniques décrites dans ce livre devrait convaincre l'amateur qu'il n'en est rien. Les

méthodes de gravure du cuivre sont maintenant éprouvées ; elles ont été couramment mises en œuvre pendant des centaines d'années dans le domaine artistique. L'application de ce savoir à l'électronique permet à l'amateur de profiter au mieux du coût réduit des composants, d'utiliser ces derniers au sein d'ensembles relativement complexes et presque compétitifs par rapport au commerce. La gravure du cuivre reste un art, et les chapitres qui suivent ont pour ambition d'en révéler les aspects fondamentaux, mais comme pour tout métier, le tour de main résulte de l'expérience ; ne soyez donc pas découragé par votre première entreprise.



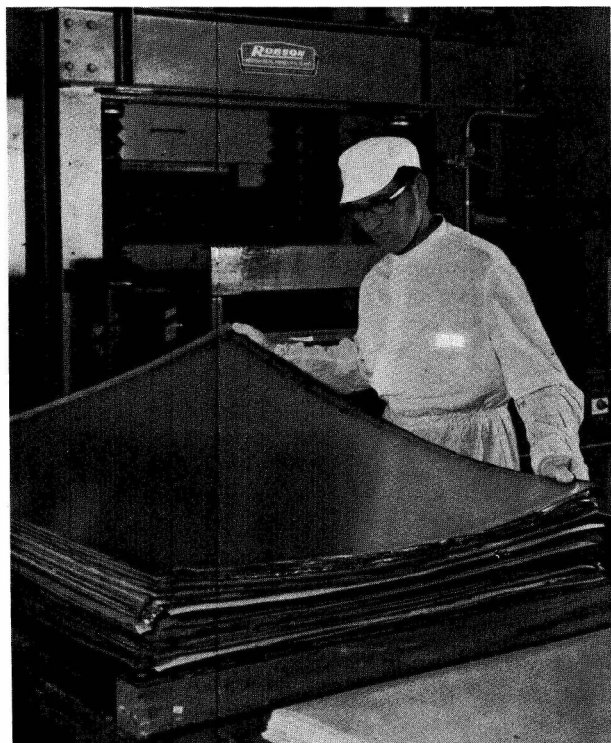
caractéristiques des matériaux de base

La matière première servant à la réalisation des circuits imprimés est constituée d'un support isolant sur lequel est collée une mince couche de cuivre laminé. Le cuivre couvre la totalité du substrat, sur l'un ou les deux côtés de celui-ci, selon qu'il s'agit de circuit simple face ou double face. Le circuit proprement dit est obtenu par enlèvement des surfaces de cuivre inutiles ; seules restent les interconnexions nécessaires aux composants qui seront implantés sur le circuit.

S'il est généralement inutile de connaître avec précision la composition et les spécifications techniques du matériau utilisé, on doit s'intéresser aux propriétés conductrices du cuivre qui le constitue. Si un courant trop intense est admis dans une piste trop mince et trop étroite, la résistance de cette piste peut altérer le fonctionnement du circuit ; au pire, l'échauffement de cette dernière peut provoquer un décollement localisé du cuivre. Ce chapitre mettra l'accent sur les caractéristiques propres aux matériaux de base constitutifs des circuits imprimés, afin de montrer aux débutants quels sont les paramètres qui influent sur la conception de ces circuits. Les figures 5 à 9 illustrent quelques-uns des facteurs dont on doit tenir compte.

Le matériau de base est obtenu par laminage de couches d'isolants stables dans le temps, tels que le papier, le tissu ou la fibre de verre, imprégnés à cœur au moyen de résines synthétiques. Les substrats isolants les plus communément utilisés sont constitués de papier rigidifié au moyen de résines phénoliques ou epoxy, et de fibres de verre liées au moyen de résine epoxy. Dans chacune des différentes variétés il est possible d'obtenir des épaisseurs allant de 0,5 à 3 mm. L'épaisseur est un paramètre déterminant pour la rigidité mécanique du circuit, particulièrement dans le cas où le circuit imprimé doit supporter

des composants de poids important. Des propriétés physiques du matériau lui-même dépendent des paramètres tels que la résistance à la flexion, le poids, la résistivité volumique, la dissipation thermique, la constante diélectrique et la tension de claquage (résistance à la perforation sous tension élevée). Un autre paramètre important est l'endurance thermique, mais celle-ci concerne plutôt l'adhésif maintenant le cuivre sur le substrat.



Matériaux de base laminés avant leur pressage à chaud (Document Bakelite Xylonite Ltd.).

Le tableau 1 mentionne les caractéristiques les plus importantes des matériaux de base utilisés, ainsi que leur composition. Les films de Mylar sont utilisés pour la réalisation de câblages souples; ils ne sont pas décrits comparativement aux matériaux ci-dessus, bien qu'ils soient largement utilisés pour des applications industrielles. Tandis que les

papiers phénoliques se révèlent comme les meilleurs isolants, les cartes en fibre de verre epoxy présentent une meilleure tenue mécanique et thermique. Bien que les cartes en verre epoxy soient plus coûteuses que leurs homologues en papier imprégné, elles sont sans doute le meilleur choix, quelles que soient les applications envisagées et les conditions d'environnement.

TABLEAU 1a. Comparaison des caractéristiques des matériaux de base pour circuits imprimés. (Informations fournies par N.V. Philips).

	Résistivité de volume (megohms).	Reprise d'humidité (%)	Constante d'électricité.	Résistance minimum à la flexion (N/cm ²).	Durée maximum de soudure à 260°C (s).	Facteur comparatif de prix
Papier phénolique.	10 ⁴	0.65	5.3	7000	5	1
Papier imprégné epoxy.	10 ⁵	0.55	5.0	9000	15	2.5
Verre epoxy.	10 ⁶	0.35	5.8	31000	30	4
Fibre de verre imprégnée polyester.	10 ⁶	0.35	3.4	20000	10	1.5

Après 96 h à 35° C et 90% d'humidité relative.

TABLEAU 1b. Identification des matériaux de base. Les inscriptions apposées par les fabricants sur le matériau sont espacées d'environ 75 mm ; les couleurs correspondent à des propriétés données ci-dessous. (Informations fournies par N.V. Philips).

Cartes fibre de verre :

Blanc	Tous usages
Rouge	Retard à la combustion
Noir	Résistant à la température

Papier imprégné :

Rouge	Retard à la combustion
Autres couleurs	Toutes autres catégories, diverses en densité, flexibilité, friabilité.

Dans l'ensemble, il y a peu de différences entre les diverses caractéristiques électriques, mais on doit dire quelques mots sur les résistivités superficielle et de volume. La résistivité superficielle est définie comme la résistance résiduelle entre pistes adjacentes sur le circuit une fois terminé. Plus les pistes sont proches, plus faible est la résistance superficielle. Cette résistance décroît encore si les pistes courent parallèlement sur le circuit ; sur une distance de plus de 10 centimètres et pour un écart entre pistes de l'ordre de 1 millimètre, la résistance que l'on peut mesurer entre deux pistes parallèles sur un substrat de verre epoxy est de l'ordre de $(5 \times 10^{11} \times 0,1) / 10$ soit 5 000 M Ω .

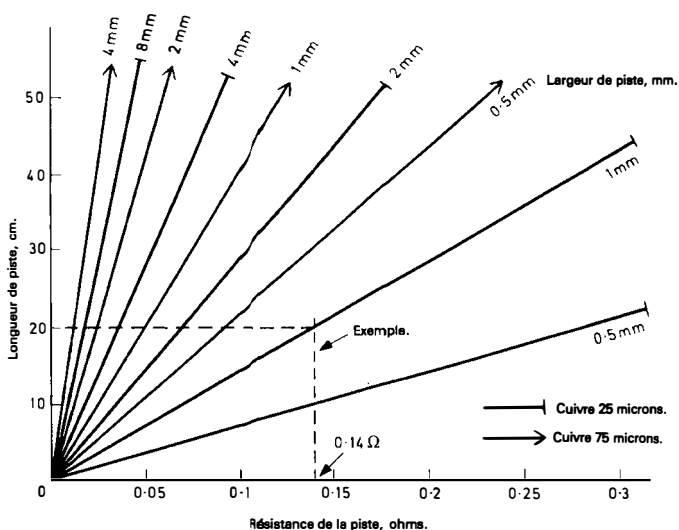


Fig. 5. Résistance des pistes de cuivre pour des longueurs (axe vertical) et des largeurs (repérées sur les courbes) données. Le réseau de courbes est donné pour des épaisseurs de cuivre de 25 microns, et de 75 microns. Exemple : une piste de 20 cm de long en 25 microns d'épaisseur, et de largeur 1 mm, présente une résistance de 0,14 ohm.

Cela peut sembler très élevé et donc sans importance pour les applications courantes. Néanmoins, on devra toujours vérifier les constantes physiques du matériau de départ utilisé, car d'autres paramètres peuvent influencer fortement ce chiffre. La reprise d'humidité du matériau peut en effet réduire sa résistance dans des proportions très importantes. Des corps étrangers ou contaminants, des défauts de sur-

face ou des brûlures autour de soudures mal faites, ainsi qu'un échauffement excessif des composants en fonctionnement peuvent gravement altérer les caractéristiques typiques du substrat.

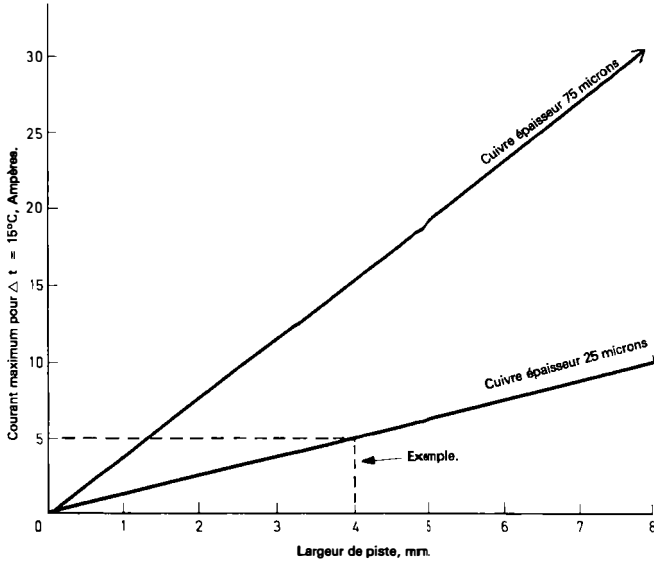
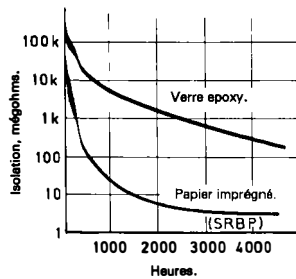


Fig. 6. Graphique donnant l'intensité maximum admissible dans une piste en fonction de sa largeur, pour des épaisseurs de 25 microns et 75 microns. Une élévation de température de 15° C par rapport à l'ambiante est admise. L'exemple montre qu'en 25 microns, une piste de 4 mm de large peut admettre 5 ampères. Il est cependant prudent de garder une marge de sécurité et de doubler les valeurs indiquées par le graphique qui sont des limites supérieures.

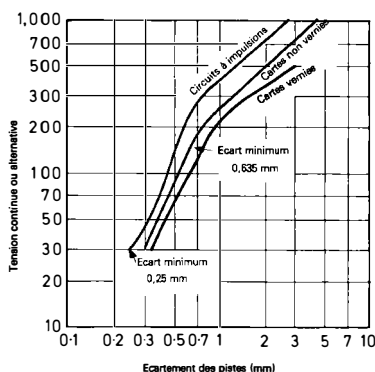
Fig. 7. La résistance d'isolement du substrat évolue dans le temps comme indiqué sur ce graphique pour le verre epoxy et le papier imprégné, à la température de 28°C et pour une humidité relative de 94%.



Une autre cause de défaut d'isolement provient de craquelures pouvant se produire à la surface du substrat. Elles peuvent être provoquées par des contraintes dans le circuit et passer totalement inaperçues car leurs dimensions sont très faibles (quelques centièmes de millimètre de largeur). Elles se comportent d'autre part comme des couplages parasites, surtout en haute fréquence tandis qu'elles n'ont aucun effet apparent en courant continu. Ces symptômes n'apparaissent généralement que par intermittence, ce qui n'en facilite pas le diagnostic.

La résistivité de volume est relative à l'isolement entre les côtés recto et verso d'un circuit double face. De même, la rigidité diélectrique est définie comme la résistance au percement par claquage sous tension très élevée entre les deux faces cuivrées. On ne peut pas, en effet, appliquer de fortes différences de potentiel entre conducteurs adjacents sur une même face, car seules les propriétés diélectriques de l'air entrent en jeu, ainsi que la forme géométrique des tranches des pistes. Des points anguleux et des coudes brusques sur les pistes peuvent induire des décharges par effet corona, lorsque des tensions importantes sont mises en jeu ; des variations localisées de résistivité superficielle peuvent donner lieu à des *micro-pontages* entre conducteurs portés à haut potentiel. Dans les applications courantes à base de transistors non spéciaux, ces problèmes ne se posent pratiquement pas.

Fig. 8. Tension maximum admissible entre pistes d'un circuit imprimé en fonction de leur écartement



Dans le cas particulier des circuits VHF les capacités parasites causées par l'emploi d'un circuit imprimé peuvent avoir une importance critique. En supposant que le plan des pistes du circuit est proche d'un plan de masse (fixations sur une plaque de châssis au moyen d'en-

tretoises ou plan de masse au verso du plan de pistes dans le cas d'un circuit double face), il est possible d'évaluer la capacité créée à travers le substrat au moyen de la formule suivante :

$$C = 0,08842 K \frac{S}{e}$$

S = surface en regard

e = distance entre les surfaces

K = constante diélectrique du substrat

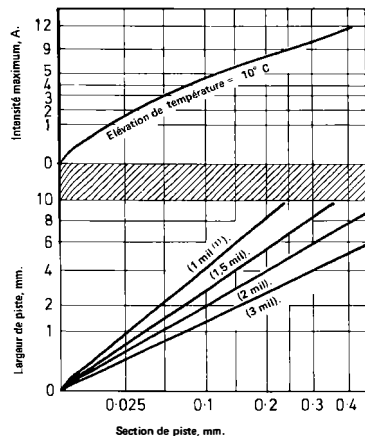
(dimensions en centimètres)

Par exemple, un conducteur de 1 cm² sur un substrat de 1 mm d'épaisseur présente, vis à vis d'un plan de masse adhérent au substrat une capacité de 5 pF. Une telle valeur est négligeable, sauf pour les applications de types VHF, où il faudra en tenir compte.

La possibilité d'usinage du circuit imprimé est souvent un paramètre important pour le choix du matériau. On ne doit pas oublier qu'il faudra réaliser de nombreux perçages pour l'insertion des composants. Naturellement, on doit utiliser des mèches d'excellente qualité mais malheureusement elles s'usent très vite, surtout dans la fibre de verre. Du fait de leurs petites dimensions il est rarement possible de les rafraîchir avec précision à la main et elles risquent constamment de se briser. Avec une mèche neuve, on obtient des perçages très propres, sans aucune bavure ou presque de part et d'autre de la carte, mais il ne faut pas attendre longtemps avant de voir la partie active de la pèche, usée ou émoussée, provoquer des bavures, et au pire, des délaminages ou des écailles dans le substrat. Le cuivre risque même d'être soulevé, ou son adhérence affaiblie.

Fig. 9. Largeurs de pistes conseillées et débit maximum admissible en fonction de leur section. Note du traducteur : le « mil » est couramment utilisé dans le domaine des produits laminés utilisés dans l'industrie électronique. Il s'agit du milliè^me de pouce, soit 25,7 x 10⁻³ = 25 microns.

(1) 1 mil = 1 milliè^me de pouce.



Les délaminages sont moins susceptibles de se produire sur des substrats de fibre de verre mais dans ce matériau, les mèches de perçage s'usent très rapidement. Les papiers imprégnés phénol ou epoxy semblent plus faciles à percer, mais les risques de délaminage ne sont pas négligeables. Ils sont beaucoup plus cassants que la fibre de verre lors du perçage et de la découpe. D'autre part, l'insertion de traversées ou de plots risque plus souvent de provoquer des écailles.

TABLEAU 2. Écart entre pistes sur un circuit imprimé, pour des potentiels donnés entre pistes.

<i>Tension de pointe Entre conducteurs (V).</i>	<i>Écart minimum à respecter (mm).</i>
0–50	0.5 mm
51–100	0.7 mm
101–170	1.0 mm
171–250	1.2 mm
251–500	3.0 mm

Nota : Pour des tensions supérieures à 700 V, les circuits imprimés ne sont pas recommandés.

Le choix des matériaux de base semble donc difficile mais les ressources et l'expérience de l'amateur lui serviront de guide. La fibre de verre est généralement choisie pour sa meilleure résistance mécanique, son endurance et sa facilité de façonnage. Sa stabilité dans des conditions de fonctionnement défavorables telles que la chaleur, l'humidité ou les ambiances sujettes à contamination par les graisses, est très appréciée, surtout lorsqu'on travaille en VHF.

Les circuits imprimés à base de fibre de verre ont un aspect « professionnel » et paraissent ainsi plus nets. Un avantage supplémentaire de ce type de matériau est qu'il est translucide et au moyen d'un éclairage par transparence, on peut suivre les pistes sur la carte très facilement, ce qui rend les contrôles plus aisés.

La plupart des matériaux de base sont habillés d'une feuille de cuivre laminé d'une épaisseur pouvant varier de 25 à 75 microns, (le micron vaut un millième de millimètre). Ce cuivre est très pur ; une pureté de 99,9% est nécessaire pour garantir une bonne soudabilité à la vague ; cette pureté intervient aussi sur la qualité de la gravure, comme sur la résistivité des pistes, très sensible à de faibles taux d'impureté. Les soudures doivent présenter la plus faible résistance possible, afin d'éviter les anomalies de fonctionnement ultérieures, pouvant aller d'une perte de puissance d'alimentation à la réduction de l'efficacité des

découplages, conduisant à des accrochages intempestifs. Dans les cas extrêmes, on peut observer des échauffements excessifs des pistes conductrices, si elles sont trop résistantes.

La résistivité du cuivre est de l'ordre de $1,7 \times 10^{-6}$ ohms x centimètre. Cette valeur correspond à la résistance d'un bloc de cuivre de 1 cm^2 de section et de 1 cm de longueur. Cette donnée permet de calculer la résistance d'une piste de cuivre de longueur et de section donnée. Par exemple, la résistance par unité de longueur d'une piste de cuivre de 1 mm de large, de 25 microns d'épaisseur est égale à $(1,7 \times 10^{-6}) / (0,1 \times 25 \times 10^{-4})$ soit $0,007 \text{ ohm}$ par centimètre.

Il est possible d'envisager des longueurs de l'ordre de 20 cm , même sur un circuit imprimé de petites dimensions, dans ce cas une résistance additionnelle de $0,14 \Omega$ est introduite en série avec les composants reliés par cette piste. De grandes intensités peuvent être admises à travers de faibles sections de cuivre. La norme admise est de l'ordre de 5 000 A par centimètre carré de section pour une élévation de température de 15° au-dessus de l'ambiante. Dans l'exemple précédent, on pourrait admettre $1,25 \text{ A}$. La perte ohmique le long de la piste serait voisine de $0,2 \text{ V}$. Les problèmes d'intensité ne doivent pas cependant éclipser les problèmes de tensions. En pratique, des conducteurs de 1 mm de largeur ne présentent pas de problèmes particuliers en signal à faible niveau, mais on doit être prudent en ce qui concerne les alimentations et les amplificateurs de puissance. En cas de doute, il vaut mieux être généreux quant aux largeurs des pistes généralement les pistes trop étroites restent sujettes à d'éventuelles criques ou fractures partielles, ce qu'on ne doit pas perdre de vue.

D'autre part, on doit considérer que les risques d'amorçage sont plus probables entre pistes adjacentes qu'à travers le substrat. Le tableau 2 donne les écarts entre pistes à respecter en fonction de leur différence de potentiel. Le cuivre laminé adhère au substrat grâce à la résine liant le matériau (papier ou fibre de verre), qui présente une résistance exceptionnelle en traction et en cisaillement. Cela ne signifie malheureusement pas que les risques de délaminage du cuivre soient négligeables. Plus les pistes sont étroites, plus ce risque augmente. C'est la raison pour laquelle les composants massifs ne devront jamais être maintenus uniquement par leurs soudures, ce qui risquerait d'arracher les pistes au niveau de ces soudures. Un frettage ou une fixation mécanique est impérative. Les dangers d'arrachement des pistes sont très importants lors d'un remplacement de composant, car les flux thermiques dus au dessoudage et au soudage consécutifs mettent à rude épreuve l'adhérence du cuivre sur le substrat.

3 projet d'implantation de circuits imprimés

La partie la plus difficile de la réalisation d'un circuit imprimé n'est autre que la transposition d'un schéma théorique en une implantation susceptible d'être matérialisée en domaines de cuivre ne présentant aucun croisement et n'introduisant aucun effet parasite dans le fonctionnement électronique. Malgré cette difficulté, la réussite procure une réelle satisfaction intellectuelle ; un travail réalisé avec le plus grand soin peut conduire à l'obtention d'un petit chef d'œuvre. Quelques règles doivent être cependant observées pour atteindre le meilleur résultat sans trop d'ennuis. Elles sont l'objet du présent chapitre ; au début de son apprentissage, l'amateur apprendra à éviter les pièges et à résoudre les problèmes les plus courants. A plus d'un titre, l'étude d'une implantation ressemble au déchiffrement d'un code, ou à la résolution d'un puzzle. La réalisation du circuit imprimé sera affaire de routine dans la mesure où l'on aura apporté tout le soin nécessaire à la conception initiale.

Il existe de nombreuses méthodes pour transposer un circuit, conduisant à des implantations différentes ; les goûts individuels peuvent librement s'exprimer, dans les limites de règles à ne pas négliger. Il est facile à chacun d'imprimer (c'est le cas de le dire) son propre style à sa réalisation, au point de la personnaliser. Les suggestions apportées par cet ouvrage reposent sur certaines préférences de ses auteurs, et ne doivent donc être considérées qu'à titre indicatif.

Avec un peu d'expérience, l'amateur se forgera ses méthodes et ses tours de main. Cependant, les idées rassemblées ici l'aideront à éviter les erreurs fatales ou à trouver de meilleurs moyens de réalisation, issus de son expérience.

Le premier problème est d'établir un plan d'interconnexion des composants devant être reliés ensemble en ordre correct en passant par le cuivre, disposé sur le substrat, et en réduisant au minimum le nombre de liaisons surajoutées (fil isolé). L'adresse du constructeur se révèle dans la manière dont il résout ce problème. Il doit aussi éloigner les composants dont le voisinage risquerait de provoquer des couplages intempestifs par influence inductive, capacité, ou électromagnétique (transformateurs).

Instinctivement, le constructeur tendra à donner à son circuit les dimensions les plus faibles possible, au risque d'aggraver les influences mentionnées ci-dessus ; il ne doit pas oublier, au moment de la conception de son circuit que certaines pistes doivent être surdimensionnées (surintensités éventuelles, rôle de blindage).

Ces difficultés peuvent sembler terriblement imbriquées à l'amateur et le dissuader de continuer plus avant. En présence d'une implantation déjà définie, l'obtention d'un circuit terminé est facile et les insuccès résultent surtout d'un manque de conviction.

Dans le câblage fil à fil, les dimensions individuelles des composants élémentaires ne sont pas critiques, du fait que les contraintes d'encombrement ne sont pas prépondérantes. La troisième dimension (empilage de composants, fagots ou foisonnement) est disponible pour résoudre les problèmes. Cela n'est plus valable dans le cas des circuits imprimés, où les connexions trop longues peuvent conduire à des courts-circuits. (Un chapitre ultérieur illustrera quelques-unes des bonnes et mauvaises méthodes d'insertion sur les circuits des composants électroniques, y compris ceux dont les queues sont préformées de manière particulière).

Conception

Lors de la conception de l'implantation, on doit estimer l'encombrement minimum (longueur et largeur) des composants. Avant de commencer un dessin d'implantation, on doit avoir sous les yeux tous les composants qui seront nécessaires, de manière à préciser les encombrements individuels dont la « somme » fournira les dimensions du circuit. Les modifications ultérieures pourront nécessiter le remplacement d'un composant par un autre... généralement plus encombrant. Il est donc avisé de réserver une marge pour chaque composant tenant compte de ce fait, et de ne pas « étouffer » l'implantation. On ne doit pas oublier non plus que certains composants requièrent une ventilation pour évacuer les calories (résistances 1 watt ou plus), et ceux-ci doivent être surélevés par rapport au circuit, de manière à laisser l'air circuler librement.

Les dimensions exactes des transformateurs ou des self-inductances sont généralement plus difficiles à prévoir, si l'on n'a pas sous les yeux un échantillon identique à ce qui sera monté sur le circuit. On doit aussi tenir compte des dégagements nécessaires au montage de supports en matière plastique ou aux fixations par vis ; on doit prévoir l'espace nécessaire aux composants présentant des excroissances ou des formes particulières. Il faut de même laisser le chemin libre pour le réglage ultérieur de certains composants. Des perçages ou des découpes peuvent être nécessaires pour le montage d'accessoires à proximité des composants insérés sur la carte.

La carte terminée n'a nul besoin d'être particulièrement agréable à regarder, mais la plupart des amateurs et des professionnels ne restent pas insensibles à un certain « fini » industriel. Cela peut faciliter la recherche d'un mauvais fonctionnement, puisqu'il est plus aisé de suivre des pistes implantées avec un souci de clarté. Dans l'industrie, on place sur le circuit les résistances et les capacités en rangées ordonnées et l'amateur aura tout avantage à s'inspirer de cette disposition. On peut aussi pratiquement calquer le schéma théorique, du point de vue de la disposition des composants (fig. 10 et fig. 11) sans oublier bien sûr de trouver une solution pour les croisements.

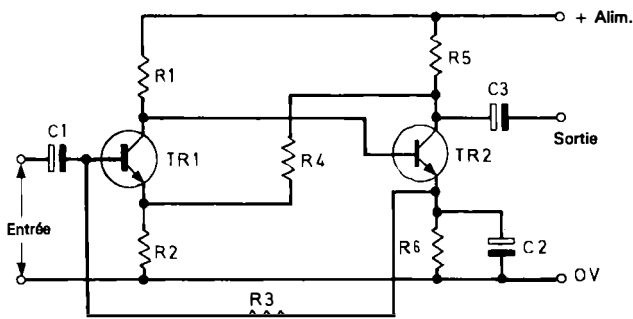


Fig. 10. Un amplificateur à couplage direct à deux étages avec réaction en continu.

L'ordre logique des transistors peut avantageusement être répété sur la carte, ce qui constitue une garantie d'optimisation de la conception du circuit. De la même manière, les circuits intégrés, lorsqu'ils sont nombreux, seront organisés en files parallèles, les autres composants étant logés dans les couloirs ainsi ménagés. Les photographies de ce chapitre et des suivants illustreront clairement ces principes généraux.

Il est évident que les considérations esthétiques ne doivent pas l'emporter sur toutes les autres, lors de la conception du circuit. Il se peut que d'autres aspects du problème à résoudre rendent tout à fait inopportun de se soucier de l'apparence finale du circuit imprimé ; il s'agit avant tout que celui-ci fonctionne correctement.

Avant de dessiner une implantation, il est conseillé de disposer physiquement les composants sur une feuille de papier, de manière à juger de l'aspect final éventuel ; on peut les redistribuer à vue jusqu'à être soi-même convaincu d'avoir obtenu la meilleure répartition possible – et en général la plus logique. On prend ensuite une feuille de papier quadrillé dont les lignes et les colonnes sont repérées par un système de lettres et de chiffres (grille de mots croisés). On dessine au crayon (il faudra sûrement gommer), l'aspect réel des composants aux emplacements choisis, à une échelle confortable, dépendant de la taille des éléments utilisés.

On pointe les extrémités des queues de composant et les connexions à l'endroit où elles devraient être sur le circuit et on essaie de tracer les pistes d'interconnexion selon le schéma théorique, en repérant soigneusement (couleurs différentes par exemple) les liaisons susceptibles de se croiser, dans ce premier essai. Il ne faut pas trop se concentrer sur ces croisements pour l'instant et poursuivre jusqu'au bout. Il peut être nécessaire de faire tourner certains composants de manière à rapprocher leurs extrémités des connexions d'autres éléments. L'échelle du dessin peut être contrôlée en disposant les composants eux-mêmes sur celui-ci. Généralement, l'échelle 2 est tout à fait convenable pour un tel travail. Si deux connections se croisent, on peut redessiner celles-ci en modifiant leur cheminement sur le circuit.

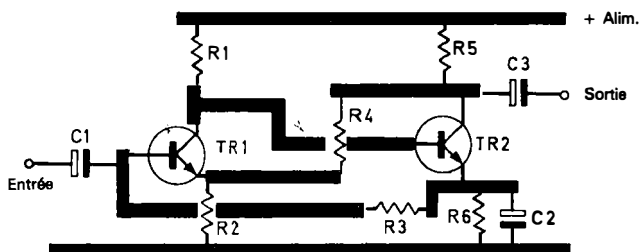


Fig. 11. Le circuit de la figure 10 a été redessiné afin de montrer comment on réalise les interconnexions au moyen de pastilles ou de bandes de cuivre.

Les liaisons de masse doivent normalement être collectées par un « plan de masse », matérialisé par un chemin de cuivre formant le périmètre de la carte. Si l'on veut, les pistes d'alimentation pourront

suivre un chemin implanté entre le plan de masse et le circuit proprement dit, ou bien venir s'insérer au milieu de l'implantation d'ensemble.

On devra à tout prix éviter les pistes trop fines car elles sont très sensibles aux excès de température dûs à la soudure. Les fractures dans le cuivre sont très difficiles à détecter et peuvent engendrer des défauts intermittents. Bien sûr, dans certains cas, on ne peut échapper à l'utilisation de pistes très fines. D'autre part il vaut mieux ménager des réserves de cuivre sur le circuit, qui se révéleront utiles lors de modifications ultérieures ou lorsque des problèmes de blindage surgiront.

La figure 10 montre le schéma électrique d'un circuit relativement simple ; il s'agit d'un amplificateur à transistors à deux étages avec liaison directe et contre réaction agissant sur la polarisation du premier étage. La première étape consiste à réarranger le circuit afin d'éliminer les croisements. Cela n'est pas facile du premier coup, et il peut rester un ou deux croisements dont on ne peut se débarrasser. Dans l'implantation finale, nous pourrons prévoir une liaison par le cuivre entre TR1 et TR2, tandis que R4 réalisera un pontage entre pistes, du côté composant. R3 jouera le même rôle. La figure 12 montre une ébauche approximative, réalisée sur papier quadrillé courant.

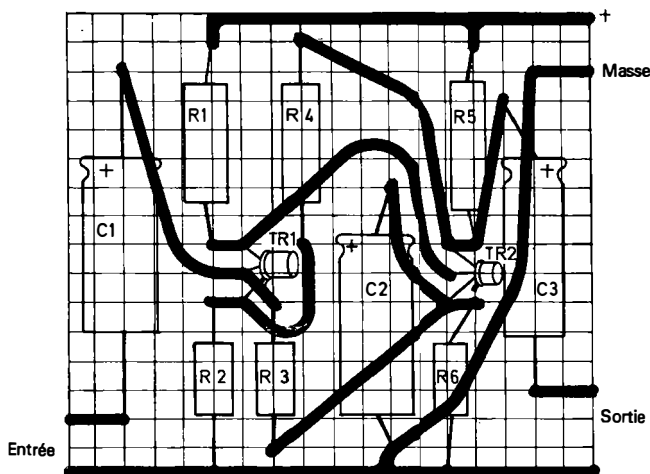


Fig 12. Le même circuit « implanté » sur papier, avec les composants apparaissant à l'échelle 1. Noter l'emploi d'une grille pour placer les futurs perçages.

On dessinera au crayon les projets d'implantation sans appuyer trop fortement pour permettre les retouches, dont il ne faut pas être avare.

On réalise l'implantation en respectant la convention de regarder le circuit toujours du côté composant ; la symétrie sera effectuée ultérieurement lorsqu'il s'agira de graver le côté cuivre. A ce stade, la dimension des composants n'est pas capitale pour le projet, pour autant qu'une marge raisonnable ait été prévue sur le circuit. Lorsque l'on est persuadé d'avoir obtenu une disposition cohérente et des espacements raisonnables des composants, on dessine en couleur les liaisons esquissées ; point n'est besoin d'un grand talent pour réaliser ce travail, il suffit de guider son crayon parmi les formes des composants déjà tracées.

Le résultat ne sera pas forcément artistique, mais cela n'a aucune importance pour l'instant. Si vous ne voulez pas utiliser de papier quadrillé, vous pouvez toujours placer du papier calque sur un fond quadrillé assez contrasté. On peut ainsi réutiliser le quadrillage qui sert de grille de référence, et le papier calque, par retournement et transparence, fournit l'aspect de l'implantation telle qu'elle apparaîtra côté cuivre.

Lorsque des risques d'accrochage peuvent se présenter (circuits radio), il y a intérêt à grossir les pistes de masse et d'alimentation. Tout le cuivre non utilisé jouera le rôle de plan de masse, équivalent au châssis de l'ancienne technologie. Cela est fondamental lorsqu'on travaille à faible niveau et avec des circuits présentant des impédances très élevées. Ce plan de cuivre peut ensuite être connecté aux écrans, blindages, ou autres, existant sur les composants, ou introduits pour éviter les effets de rayonnement.

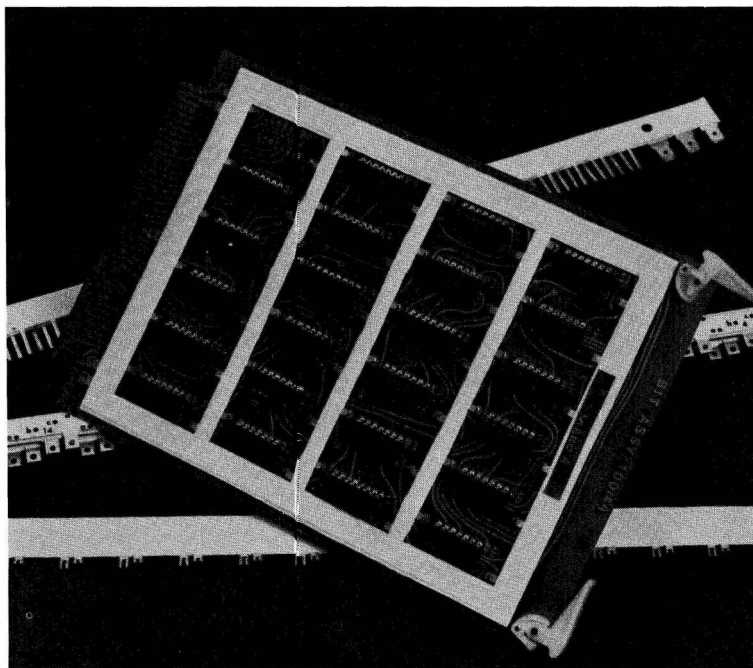
Une fois ébauchées les positions des lignes d'alimentation et du plan de masse, le circuit proprement dit ressort mieux de l'ensemble des composants. Il est inévitable, à ce niveau que quelques croisements subsistent, qu'il va falloir éliminer en réarrangeant des composants de façon à leur faire jouer le rôle de pontage déjà vu plus haut. Cela peut sembler impossible à première vue, mais quelques interventions au crayon sur le projet d'implantation conduiront au résultat. Dans le cas contraire, un fil isolé est utilisé comme un composant ordinaire. Il ne faut cependant pas en multiplier le nombre et de toute façon, seules les implantations de circuits très complexes tombent dans ce cas particulier.

Il existe de nombreux *tours de métier* aidant à la réduction des croisements et à la suppression des fils « volants », comme par exemple de contourner une piste en son point de connexion (et de terminaison) à un composant, comme le montre la figure 12. Il ne faut pas oublier que l'on ne doit pas réduire la largeur des pistes en dessous de la limite permise et que l'on doit élargir celles-ci aux endroits où seront réalisées

des connexions. Il peut ainsi être très laborieux de former des pistes au voisinage immédiat des pattes de transistors ou de circuits intégrés. Il est possible et on y est parfois contraint, de faire passer des pistes de cuivre entre les connexions de ces pattes sur le circuit (boîtiers D.I.L., Dual In Line). Cela se fait couramment dans l'industrie et sur les circuits préimprimés standards.

Lorsqu'une grande quantité de circuits intégrés sont utilisés, on doit prévoir un système collectif d'alimentation. On peut disposer sur le circuit un réseau de pistes larges occupant le périmètre de la carte et muni de transversales permettant d'atteindre facilement chaque circuit intégré en faisant passer des pistes entre les rangées de pattes (fig. 13a).

Un exemple d'alimentation de circuit par piste « bus » utilisé dans l'industrie est illustré par la photo ci-après. Bien que cette réalisation, de par son coût, ne soit pas du domaine de l'amateur, on peut y voir un exemple de la souplesse apportée par ce système et de la facilité d'obtention d'une implantation très claire, incluant tous les circuits d'alimentation.



Carte de grande dimension pour circuits intégrés à boîtiers DIL. On notera la clarté de l'implantation, ainsi que le réseau d'alimentation des circuits intégrés. Ce dernier possède des propriétés de découplage en signaux impulsionnels.

L'avantage fondamental de la solution *bus* est que ces derniers peuvent être considérés comme des composants ordinaires et placés sur le circuit selon les désirs de l'utilisateur ; d'autre part, ils peuvent être réalisés de manière à posséder leur capacité de découplage sous forme répartie (surfaces + et - en regard sur toute la longueur du bus) de manière à refermer localement les courants alternatifs engendrés dans les circuits et à éviter leur remontée vers les alimentations. Ils peuvent être montés horizontalement ou verticalement comme le montre la figure 14 , dans le dernier cas, leur encombrement est négligeable.

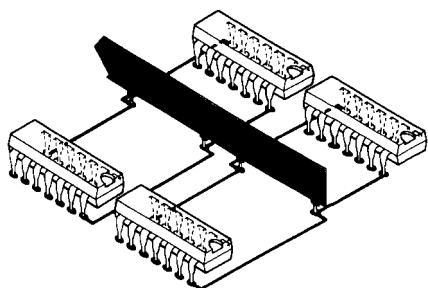


Fig. 14. Implantation d'un bus d'alimentation sur une carte pour circuits imprimés à boîtiers DIL (transmis par N. V. Ghent).

Bien entendu, on peut admettre tout compromis rendu nécessaire par l'objectif poursuivi, (alimentation par bus et par piste) selon l'accessibilité des pattes des composants. Quelle que soit la méthode retenue, il faut avant tout implanter les pistes d'alimentation car c'est d'elles que dépend l'implantation complète. La figure 15 montre un exemple d'implantation (côté cuivre) du projet représenté au figure 12 , on y remarquera les pistes d'alimentation.

Les détails de cheminement de signaux alternatifs ou continus s'obtiennent en se guidant sur le positionnement initial des composants. On a tout intérêt, d'ailleurs à organiser l'implantation en suivant logiquement, étage par étage, le schéma de départ (pour des circuits complexes, le point de vue peut-être différent surtout si les liaisons existent d'un étage vers plusieurs autres) en le rendant compatible avec des dimensions raisonnables. Il serait inconséquent d'éparpiller les composants au hasard et même si cela était acceptable à première vue, le dessin des pistes, ou la recherche ultérieure des pannes ne se ferait qu'avec de grandes difficultés.

Deux méthodes sont possibles pour utiliser le cuivre en tant que circuit d'interconnexion. La première consiste à enlever seulement le cuivre de manière à réaliser des îlots indépendants n'existant qu'au niveau des connexions multiples de composants ; la seconde consiste à

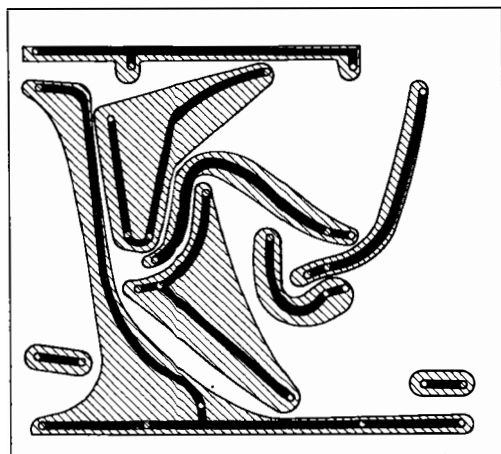


Fig. 15. Le dessin de la figure 12 est reproduit « retourné » sur le cuivre, au moyen d'un masque ou d'un film photographique. On laissera le plus de cuivre possible pour avoir une bonne adhérence après gravure.

établir des « routes » constituant un système de liaison conventionnel d'un composant à l'autre, avec un épanouissement aux endroits où seront réalisées des soudures. Les deux systèmes ayant leurs avantages, il sera utile de les mettre à profit au sein d'une même réalisation.

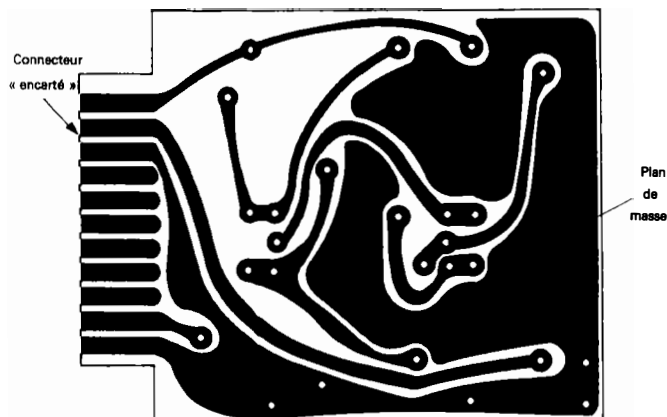


Fig. 16. Le même circuit que celui de la figure 15, muni d'un connecteur encarté. La masse est répartie sur la plus grande partie disponible de la carte.

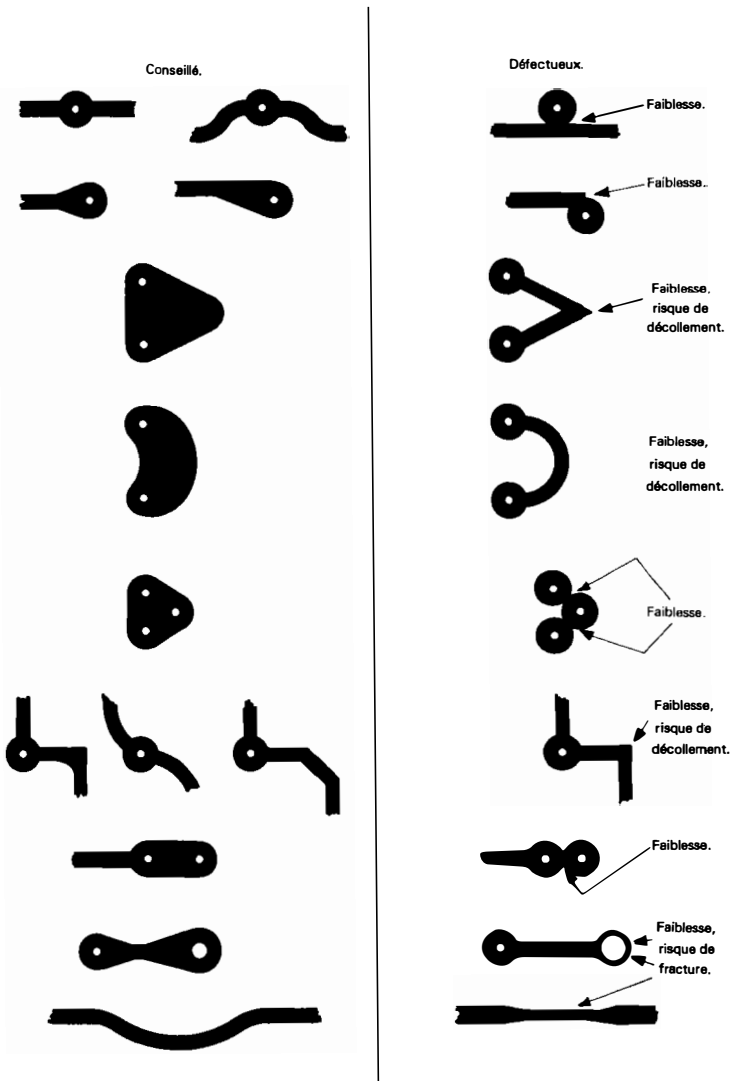


Fig. 17. Bons et mauvais pastillages.

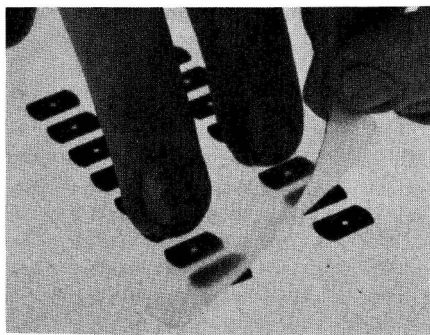
Les pistes esquissées sur le projet d'implantation doivent être contrôlées par comparaison avec le schéma théorique. Il est sage de donner des repères topologiques aux formes correspondant aux positions des composants. Maintenant que l'on a obtenu une esquisse de ce que sera la future implantation, on peut retourner le papier, et l'observer par transparence, au-dessus d'une lampe ; le pistage apparaît immédiatement, tel qu'il devra être réalisé côté cuivre de la carte.

Il s'agit maintenant de mettre au propre, avec soin, ce brouillon d'implantation avant de passer à la gravure du cuivre. Si vous avez un compas, des pistols (profils comportant diverses courbes, permettant de reproduire par segment tout dessin présentant des contours continus ou anguleux) ou tout autre appareil d'aide au dessin, ils seront les bienvenus pour faire des tracés réguliers et précis. Ne laissez jamais d'angles vifs et habituez-vous à dessiner des contours « régulièrement variables ». Lorsqu'on dessine le projet définitif, on doit tenir compte de l'adhérence du cuivre, et des contraintes que risquent de lui appliquer les soudures ou les échauffements dûs aux composants. La figure 17 donne quelques exemples de ce qu'il faut faire et ne pas faire.

De nombreux auxiliaires sont produits industriellement permettant de mettre en forme le dessin définitif. Certains consistent en préformes de film plastique, prêtes à être fixées par pression-adhérence au papier sur lequel on travaille. On économise ainsi beaucoup de temps et on évite de perdre son calme, pour autant qu'on veuille prendre la peine de placer avec soin ces « transferts ». Les contours irréguliers peuvent être améliorés au moyen d'encre noire. Aux endroits où l'on devra percer des trous, il faut dessiner des cercles de très petit diamètre, dont l'intérieur est évidé. Au moment de la gravure, on obtiendra un début d'attaque du cuivre, qui permettra de placer l'outil de perçage avec précision ; cela évitera d'avoir à réaliser un gabarit complet de perçage et renseignera sur l'efficacité de l'attaque du cuivre.

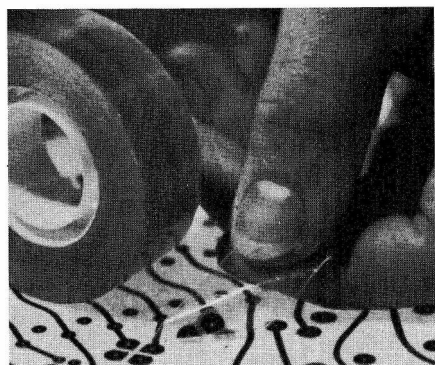
On doit apporter un certain soin à la réalisation de ces perçages. Leur position, tout d'abord, résulte directement de l'implantation réalisée ; un bon principe consiste à les aligner par rangées parallèles, plutôt que de les éparpiller aléatoirement. Sur chacune de ces rangées, les trous seront percés suivant un pas commensurable avec la taille des composants, et permettant d'espacer ces derniers, afin qu'ils ne se touchent pas latéralement. Un coup d'œil sur la photographie de la page 34 montre une implantation correcte de résistances régulièrement espacées suivant un tel principe. Rappelons-nous aussi que si des interactions sont probables entre composants, les parties sensibles du circuit doivent impérativement en être éloignées.

Certains composants peuvent ignorer un montage sur plots ou par fixation mécaniques (boulons, écrous). De tels intermédiaires de montage peuvent nécessiter leur connexion au plan de masse.



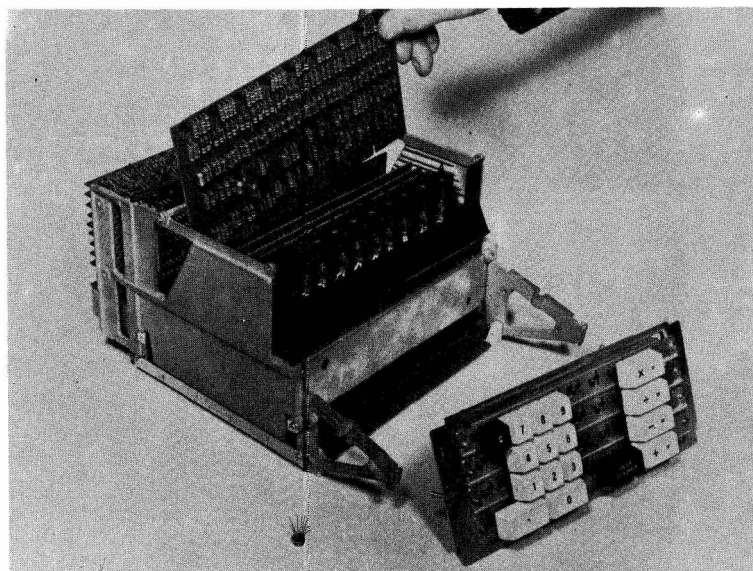
Transfert de figurines-masques sur papier calque.

Ajustement de la position du « transfert ».



Enlèvement d'une figurine mal positionnée au moyen d'un ruban adhésif. Attention de ne pas enlever aussi des transferts du voisinage. (Documents Mécanorma).

Les trous de fixation correspondants seront d'un diamètre évidemment plus gros que ceux destinés aux queues des composants, des pastilles de cuivre devront donc être prévues autour de ces trous et présenter des dimensions confortables. Les pistes d'alimentation doivent aussi être munies, à leurs extrémités, de trous pour raccordement par fils de liaisons à la source de tension ; de même, certaines liaisons d'un circuit à l'autre par fils souples requièrent des percages supplémentaires sur l'implantation. On s'arrangera pour prévoir en bordure de carte les arrivées et les départs de telles liaisons. Des plots de reprise peuvent être montés qui assurent une meilleure tenue mécanique des soudures, à l'arrivée sur la carte de ces liaisons. (En général, les fils souffrent au droit de leur dénudage ; un plot avec une soudure généreuse permet de rigidifier le fil sur les premiers millimètres de son départ, là où les risques de contrainte par pliage sont les plus grands).



Cette technique permet de réduire les dimensions des équipements. Il s'agit ici d'un calculateur de bureau. On peut voir sur la partie avant du châssis les tubes d'affichage numérique, ainsi que l'emplacement du clavier de commande, qui apparaît au premier plan. (Document Bakelite Xylonite Ltd.).

Les liaisons d'entrée doivent être aussi éloignées que possible des liaisons de sortie, ceci concerne les points chauds. Lorsque ces liaisons mettent en jeu du fil blindé, on aura intérêt à rapprocher au maximum les connexions de masse de l'entrée et de la sortie, afin d'éviter ce qu'on appelle une boucle de masse (accrochages dans les amplificateurs). C'est pour cette raison que le plan de masse formé par le cuivre non utilisé devra être le plus grand possible, afin de refermer efficacement les lignes de champ éventuelles, toujours indésirables — du moins en basse fréquence — les circuits utilisant un connecteur en bordure de carte sont très souvent conçus selon ce principe.

Les pistes d'entrée et de sortie peuvent de toute façon être séparées par une piste reliée à la masse, jouant en somme le rôle d'écran de surface et venant jusqu'au niveau des pastilles ou des plots d'entrée et de sortie. On peut réaliser, à partir du plan de masse, des arborescences de telles pistes de masse, de manière à créer autant d'écrans qu'il est nécessaire, côtoyant sur la carte les pistes dont on doit assurer le découplage inductif ou capacitif. On ne doit pas oublier que ces pistes d'écran ne jouent leur rôle que si leur ensemble est relié à la masse commune, c'est-à-dire le plan de masse. Une piste écran « en l'air » ne jouant aucun rôle, sinon de renforcer le couplage que l'on veut éviter. On doit absolument interdire la formation d'une boucle électrique entourant le circuit, pour un tel plan de masse, ce qui conduirait à tous les effets parasites imaginables et le plus souvent inguérissables sinon au moyen d'une multitude de capacités, évidemment non prévues lors de l'implantation.

La méthode en usage dans l'industrie consiste à utiliser une grille standard, orthogonale, au pas de $1/10''$ de pouce, soit 2,5 mm (valeur anglo-saxonne, maintenant internationale). Ce système permet de réaliser des implantations précises et d'appliquer des méthodes de perçage rationnelles, surtout dans le cas d'implantations à grande densité de composants. Au niveau de l'amateur, cette manière de faire est tout aussi profitable, c'est suivant ce principe que l'on utilise du papier quadrillé pour dessiner l'implantation. Les trous sont tous placés aux intersections des lignes et des colonnes de la grille (on dit que l'on a une disposition en matrice), ce qui facilite l'élaboration du projet d'implantation et donne une bonne cohérence au résultat final. Cela permet aussi de réaliser plus aisément des circuits répétitifs. Des exemples sont donnés dans les chapitres qui suivent, concernant les techniques industrielles, ainsi que des suggestions pour l'amateur.

Si l'on désire faire appel aux techniques photographiques, la symétrie par retournement de l'implantation, pour l'instant connue et dessinée côté composant, est immédiatement obtenue par retournement de la photographie de cette implantation (encore appelée typon). Les autres méthodes, ne faisant pas appel à la photo, nécessitent d'implanter

directement côté composant, au niveau du dessin. Un moyen de « retournement » consiste cependant à utiliser une feuille de papier carbone dont la surface active est directement contre le côté verso du dessin d'implantation et de retracer, côté recto en appuyant fortement, toute l'implantation ; on obtient au verso l'implantation côté cuivre désirée et l'on n'aura plus besoin de consulter le côté recto devenu inutile en ce qui concerne du moins la gravure. On peut aussi tout simplement tracer l'implantation (côté composant) sur du papier calque.

TABLEAU 3. Intensité maximum admissible dans les pistes de cuivre, en basse fréquence ou en continu à la température de 45°C.

<i>Largeur de piste mm</i>	<i>Courant maximum (a). Cuivre 1 once (35 microns).</i>	<i>Cuivre 2 onces (70 microns).</i>
0.5	2.7	4.3
0.7	3.8	5.0
1.0	4.3	7.7
1.5	6.0	10.3
2.0	8.0	13.0
2.5	9.0	14.2
3.0	10.50	17.0

La plupart des pistes d'interconnexion peuvent être réalisées en largeur de 1/10 de pouce, soit 2,5 mm. Des élargissements doivent être prévus, lorsqu'il est nécessaire (au niveau des perçages pour insérer les queues de composants). Le tableau 3 donne des ordres de grandeur approximatifs de dimensions de pistes pour du cuivre correspondant à des épaisseurs de 35 et 70 microns (appelés 1 once et 2 onces, car 28 g de cuivre ou 54 g sont laminés sur 1 pied carré). Ces valeurs ne doivent pas être suivies à la lettre, mais le pistage du circuit doit tenir compte de valeurs minimales à respecter. Lorsque des trous de 1 à 1,3 mm doivent être percés, les pistes passant par ces trous doivent s'élargir jusqu'à 3,5 mm (à comparer aux 2,5 mm mentionnés ci-dessus). Les limites inférieures à respecter apparaissent sur le tableau 4.

TABLEAU 4. Dimension minimum des pastilles de cuivre autour des perçages.

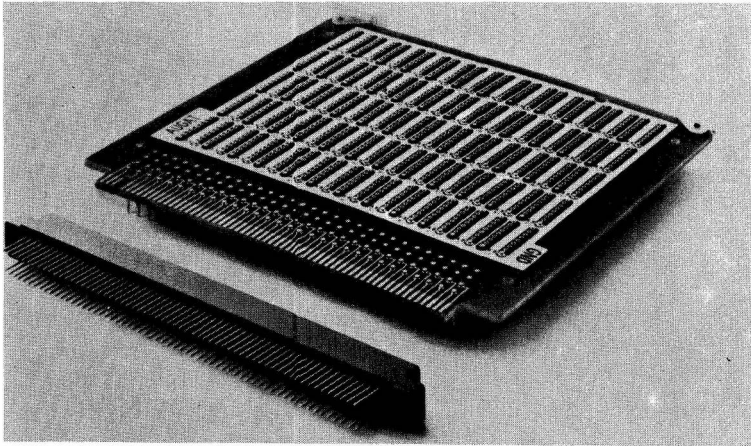
<i>Diamètre de perçage mm</i>	<i>Diamètre minimum des pastilles mm</i>
0.9	1.7
1.0	1.8
1.2	2.0
1.8	2.5
2.25	3.0
2.95	5.0
3.7	6.5
4.8	8.0
1.55	2.35
2.4	4.0
3.15	5.0
3.95	6.5
4.75	7.5
6.35	9.5

Nota : Des dimensions intermédiaires peuvent être interpolées à partir de ces exemples.

La figure 16 montre une implantation de type industriel ; il s'agit d'une carte sans connecteur rapporté ; ce système est dit *encartable* ; on remarquera le plan de masse couvrant une partie importante du circuit et les pistes circulant au sein de ce plan de masse. Les circuits double face sont cependant meilleurs pour réaliser un plan de masse efficace refermant localement au travers du substrat les lignes de champ électrique ou magnétique indésirables. La difficulté pour l'amateur consiste à réaliser deux implantations qui coïncident avec précision lorsqu'on les superpose. Le plan de masse doit en effet présenter des « clairs » aux emplacements des traversées des queues de composant et des plots (voir la photo). Des liaisons par fils peuvent être

utilisées, si besoin est, côté plan masse, à condition que le fil soit isolé. On peut aussi créer des pistes dans le plan de masse lui-même ; des traversées seront nécessaires pour relier ces pistes à celles qui se trouvent sur l'autre face, comme il apparaît sur la figure 4.

On doit aussi savoir que le cuivre peut être mis à profit pour réaliser des écoulements de flux thermique, du fait de sa bonne conduction calorifique ; la chaleur dégagée par les transistors de puissance, les circuits intégrés, pourvu que ces derniers soient physiquement au contact du cuivre, pourra être évacuée dans l'air ambiant, par convection. On utilisera à cet effet des laminés de cuivre d'épaisseur plus forte, et il ne faut pas oublier le risque de dérive des caractéristiques d'autres composants de la carte, soumis à l'influence de ce radiateur réparti sur tout le circuit.



Exemple de circuit imprimé à trous métallisés et plan de masse côté composants ; les pistes sont sur la face cachée du circuit. (Document Rastra Electronics Ltd.).

On retiendra de ces considérations qu'il faut approfondir l'étude du projet initial afin de réduire les risques de modifications en fin de réalisation, car elles sont pratiquement impossibles à effectuer sur le circuit. C'est ainsi que l'on s'assurera d'obtenir un produit présentant un « fini » professionnel. Il faudra le cas échéant « casser » son projet et repartir depuis le début, plutôt que de bricoler une réalisation qui ne donnerait en définitive que peu de satisfactions.

traitements chimiques

Ce n'est pas parce que les procédés de gravure font intervenir l'emploi des produits chimiques que l'on doit être effrayé par avance des risques d'échec. Les amateurs de photographie, dans leur genre, ont acquis progressivement leur savoir avant de s'équiper en cuvettes, flacons et matériels de développement et d'agrandissement. L'amateur électronicien franchira ce cap de la même façon, lorsqu'il décidera de réaliser son premier circuit imprimé. Par chance, il est possible de parvenir au but sans émettre d'odeurs désagréables ou incommodantes ; le perchlorure de fer est la solution couramment employée, mais d'autres produits peuvent aussi être utilisés, comme par exemple le persulfate d'ammonium. L'acide nitrique par contre peut émettre des vapeurs nuisibles et même toxiques.

Un autre chapitre parlera des techniques de gravure industrielle. Bien qu'elles soient hors de portée pour l'amateur qui ne peut s'équiper de manière coûteuse, on peut en retenir certains principes afin d'améliorer sa propre technique, dans les limites des moyens dont on dispose. Si le lecteur peut avoir accès professionnellement à des moyens de taille industrielle, il n'a alors plus rien à apprendre sur la façon de s'en servir. Pour ce qui est du néophyte, l'équipement dont il doit se munir reste tout à fait raisonnable et il peut prétendre à des résultats de qualité professionnelle s'il respecte un certain nombre de précautions et procède avec soin.

On trouve sur le marché des ensembles en « kit » permettant de réaliser soi-même très rapidement des circuits imprimés, ce qui ouvre la voie à la satisfaction de la réussite accélérée du fait que le mode d'emploi du kit détaille la gamme des opérations à effectuer. Cette réussite dépend dans une large mesure du soin que l'on aura consacré à la

préparation. Si vous avez sauté le chapitre 3, il vous faudra y retourner et vous en pénétrer avant de poursuivre le chapitre 4 et en tirer tout le profit possible. Les traitements chimiques ne sont pas difficiles, mais ils demandent un peu d'application, pour éviter des déconvenues en cours de route et le gaspillage des produits chimiques ou des matériaux.

L'équipement minimum de l'amateur, généralement disponible dans les « kits » vendus sur le marché, doit comprendre les éléments suivants :

- matériau pour circuits imprimés (verre epoxy ou papier bakelisé, laminés-cuivre sur une ou deux faces),
- produit de nettoyage (poudre à récurer ménagère),
- résine de masquage ou vernis à base d'acétone,
- solution pour gravure, ou cristaux (perchlorure de fer ou autre),
- produit pour éliminer le masque, ou dissolvant,
- solution de flux pour étamage,
- petit outillage à main tel que scalpel, spatule,
- récipients résistant aux acides (verre ou émaillés) capables de contenir entièrement la carte.

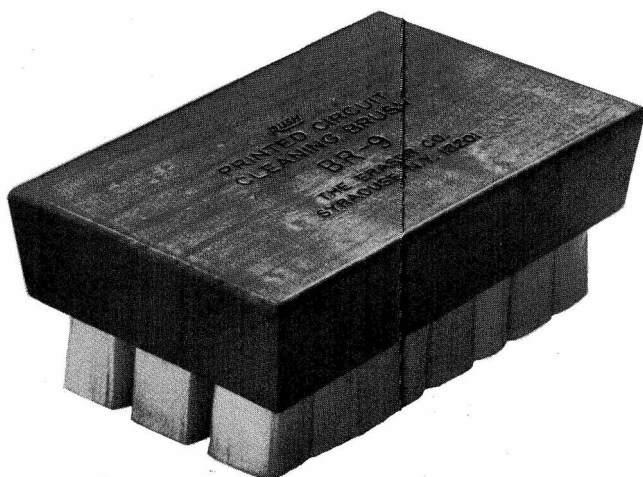
Dans le cas où ces récipients sont émaillés, il faut s'assurer qu'ils ne sont pas ébréchés.

On aura déjà préparé le dessin d'implantation (appelé couramment pastillage), ainsi que des moyens adhésifs pour le maintenir ultérieurement sur le circuit vierge (colle latex pelable). Il serait aussi utile d'avoir à portée de la main un peu de laine métallique, des chiffons de coton très propres et secs, une bonne provision de papier journal, un support muni de clayettes en matière plastique, ou des pinces, ou un râtelier à assiettes, pour le séchage des cartes à l'air libre. Si l'on a la peau sensible, on se munira de vieux gants et d'une blouse ou d'un tablier à plastron pour protéger les habits. Il est souhaitable de tout avoir sous la main avant de commencer ; s'il est nécessaire d'abandonner le travail pour plusieurs minutes, on risque de ne pas pouvoir le continuer correctement, et il faut tout reprendre.

L'industrie électronique réalise ses circuits imprimés dans des locaux dépoussiérés, (dites salles *blanches*), et l'amateur aura intérêt, lui aussi, à procéder avec le maximum de propreté. Le meilleur endroit possible est la cuisine, ou la salle de bain, ou une chambre obscure pour photographie. Un plan de travail est nécessaire ; il ne faut pas fumer pendant le déroulement des opérations, et l'on doit tenir son entourage à l'écart, pour éviter de fatales distractions. Il vaut mieux fermer la porte. Enfin, un rouleau de papier essuie-mains ou tout autre tissu éponge à grande capacité d'absorption sera d'une grande utilité en cas de maladresse dans la manipulation des produits.

La première méthode décrite ici est la plus simple et convient tout à fait pour débiter, il est souhaitable de faire un premier essai sur un petit morceau de circuit, afin de s'assurer que l'on maîtrise la technique et que l'on respecte les durées d'action des produits chimiques, ce qui est de première importance.

En supposant que l'amateur a réalisé son dessin suivant les méthodes décrites au chapitre 3, il lui faudra appliquer ce dernier sur le cuivre vierge. Il est souhaitable qu'il s'assure que le cuivre est d'une propreté absolue. Les échecs dans le déroulement des opérations résultent surtout de dépôts graisseux et des souillures du cuivre ou des ustensiles utilisés. En déballant le circuit vierge, on aura soin de le manipuler uniquement par la tranche, en évitant de toucher le cuivre. Même si les mains paraissent propres, l'humidité due à la transpiration peut au contact du cuivre provoquer des défauts ultérieurs du traitement.



Le circuit imprimé doit être efficacement brossé. Cette brosse en nylon est spécialement destinée au nettoyage du cuivre laminé. (Document Eraser International Ltd.).

Le cuivre semble parfaitement propre lorsqu'il est neuf, mais il vaut mieux le brosser énergiquement au moyen d'une poudre à récurer et d'un tampon de paille de fer très fine. Ceci aura le mérite de satiner le cuivre et de rendre apparente toute souillure ou altération pouvant se produire à sa surface. Il ne faut pas cependant trop se soucier de l'apparence obtenue, car le polissage après gravure améliorera les choses. En tenant la carte par les bords, on la rince abondamment pour éliminer les traces de poudre à récurer et on la sèche au moyen d'un chiffon sans peluche, ou dans un courant d'air, la face cuivrée inclinée

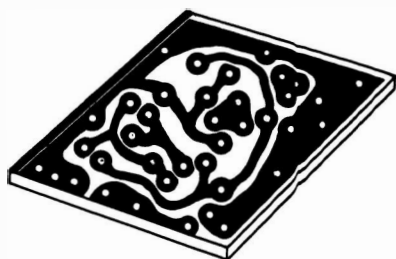


Fig. 18. Placer le dessin d'implantation (ou pastillage) sur le cuivre, et le fixer au moyen d'adhésif.

Fig. 19. Découper le dessin, pour éliminer le papier aux endroits où le cuivre devra être enduit de vernis masquant. On peut utiliser un scalpel.

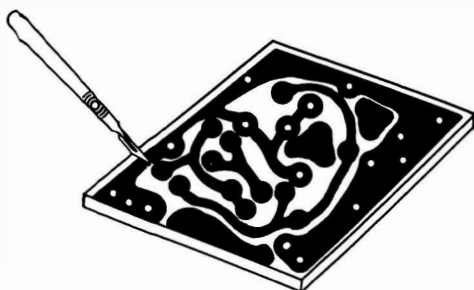


Fig. 20. Enduire de vernis le cuivre nu.

Fig. 21. Retoucher au pinceau, de manière à obtenir des plages vernies aux contours nets.



vers l'avant ou par côté ; cette opération sera faite dans un local tempéré et non poussiéreux. Aucun résidu de chiffon ou autre ne devra être présent sur le cuivre. Tandis que la carte sèche, on prépare le dessin d'implantation et le vernis masquant, ainsi que la spatule et le bain de gravure.

Il existe de nombreux moyens d'appliquer un vernis masquant pour protéger le cuivre de la solution de gravure. Si le dessin d'implantation peut être maintenu fermement appliqué sur le cuivre (fig. 18), on peut utiliser un scalpel ou une lame de rasoir pour découper le dessin avec soin et éliminer le papier aux endroits où le cuivre devra demeurer (fig. 19). On applique alors le vernis de masquage qui peut être un produit spécialement destiné à cet usage ou simplement du vernis à ongle (acétate), en s'efforçant d'obtenir des contours réguliers et propres (fig. 20). On laisse sécher soigneusement, on élimine les restes de papier, et l'adhésif qui servait de maintien temporaire au papier, on retouche le dessin formé par le masque de manière à reboucher les piqûres et à noyer les irrégularités de contour (fig. 21). Si le vernis a bavé sur des parties de cuivre où il ne doit pas se trouver, on l'élimine délicatement avec un couteau. Les bitumes ou enduits insensibles aux acides peuvent être aussi utilisés, pour autant que l'on puisse les dissoudre après gravure.

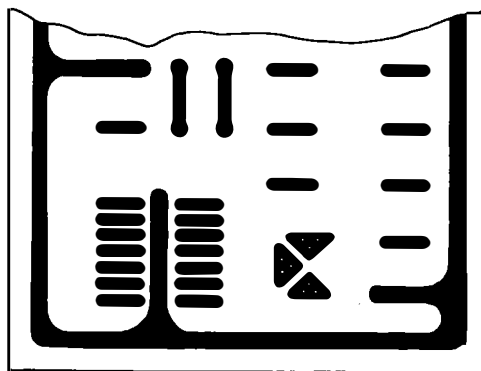


Fig. 22 Emploi de « transferts » adhésifs comme masques.

Il existe une grande variété d'applicateurs auto-alimentés en vernis de masquage, qui ressemblent à des stylos à bille de grosse taille. Bien que leur emploi soit commode, ils sont chers pour des réalisations d'amateur. Ils contiennent suffisamment de vernis pour faire plusieurs circuits imprimés. D'autres recettes pouvant servir au pied levé consistent à employer la cire à cacheter ou les marqueurs, mais leur élimination après gravure pose quelques problèmes.

Le plus commode des masques, assurant un fini professionnel et facile à éliminer, est sans doute le film plastique auto-adhésif (fig. 22). On trouve ce type de produit sous forme de rouleaux portant des masques élémentaires de contours divers, prêts à être transférés du rouleau sur le circuit à graver. Des dimensions et des formes convenant pour tous les types de transistor et de circuits intégrés sont disponibles sur le marché, assurant ainsi une implantation très précise des semi-conducteurs (voir chap. 3). De la bande adhésive est utilisée pour le masquage des pistes d'interconnexion. Cette méthode est très commode pour la réalisation de plusieurs implantations de types différents.

Les bandes adhésives sont faciles à retirer de la surface du circuit après la gravure, elles laissent des pistes aux contours précis et les emplacements pour le perçage ultérieur sont localisés avec une grande netteté. Répétons-le, cette méthode est relativement coûteuse, à moins que l'on n'ait plusieurs implantations différentes à réaliser. Les zones trop larges pour être couvertes par les bandes adhésives peuvent être habillées de feuille de plastique adhésive, découpée à la demande, ou enduites de vernis masquant.

Le chapitre 3 montre un exemple de circuit simple qui peut être transféré, ou même dessiné à main levée, sur le cuivre, pour en tester le fonctionnement électronique. Les adhésifs et applicateurs spéciaux sont assez utiles pour ce genre de travail rapide.

Quel que soit le vernis masquant utilisé, on procédera avec calme et autant de soin qu'il est possible ; on n'a pas intérêt à se hâter pour passer à autre chose.

Avant de passer à la gravure, il faut contrôler avec soin l'implantation que l'on désire réaliser, en se guidant sur le schéma électrique de départ. Les corrections sont en effet impossibles, une fois que le circuit est gravé. Vérifiez qu'aucune matière étrangère ne reste sur le cuivre ; éliminez soigneusement tout restant de papier ; la résine de masquage doit seule subsister sur le cuivre. Lorsque ce vernis est sec, vérifiez qu'aucune empreinte de doigt n'est visible sur le cuivre ; éliminez-les soigneusement dans le cas contraire.

Le bain de gravure peut être préparé dans un verre ou dans un récipient émaillé. Si l'on emploie le perchlorure de fer (le plus souvent), on doit le dissoudre avec soin suivant les proportions indiquées par le mode d'emploi du kit. en général, il faut 4 parties (en poids) de sel pour une partie d'eau. Le volume de solution convenable pour quelques cartes est de l'ordre du demi-litre d'eau pour 125 grammes de sel. Bien que ces proportions ne soient pas à respecter à la lettre, il serait inutile d'utiliser une solution plus concentrée, ce qui aurait pour effet

d'accélérer la gravure, et de la pousser trop loin ; une concentration plus faible compromettrait la régularité de la gravure. La solution utilisée industriellement dissout à peu près 70 grammes de cuivre par litre de solution.

On peut aussi utiliser l'acide nitrique, ou l'acide chromique. Le premier est très rapide et dégage des vapeurs toxiques, ce qui n'autorise pas son usage dans un cadre domestique. L'industrie utilise l'acide nitrique car il est possible de recycler les bains de gravure pour en récupérer le cuivre.

La température du local doit rester relativement constante afin d'assurer l'homogénéité de la gravure. La vitesse de gravure dépend directement de la température de bain et croît de 50% environ pour une élévation de 10°C. Une température ambiante de 20°C convient parfaitement. Au fur et à mesure que la gravure progresse, le cuivre en solution réduit la vitesse de la réaction. Il peut être nécessaire si la température est élevée, d'arrêter la réaction en versant de l'eau pour diluer la solution, si une grande quantité de cartes est en traitement dans le bain. Lorsque le temps de gravure d'un circuit a doublé par rapport au temps de traitement du premier circuit avec le bain neuf, il faut jeter la solution, soigneusement nettoyer le récipient de traitement et renouveler le bain. Les solutions usagées doivent être largement diluées et rejetées dans un endroit isolé (terrain vague ou autre), il ne faut surtout pas les verser dans les canalisations d'évacuation domestiques ou sanitaires.

Pour éviter que des parcelles de cuivre ne viennent perturber les gravures successives, on doit agiter doucement la solution en remuant le récipient (rotation ou translation) ; on peut ne le faire que par intermittence. Si l'on a l'intention de réaliser un grand nombre de circuits, il vaut mieux utiliser un bain circulant dans le récipient de traitement au moyen d'une pompe d'entraînement, réalisant un circuit fermé avec un bain de gravure contenu dans un récipient auxiliaire, ce qui rajeunit constamment le bain de gravure.

Il est prudent de surveiller attentivement le déroulement de la gravure ; au besoin, s'il y a des risques d'éclaboussures, des lunettes de protection sont obligatoires. On ne doit pas laisser les circuits dans le bain plus longtemps qu'il n'est strictement nécessaire à l'enlèvement de la quantité de cuivre désirée. Si le vernis de masquage protège bien la surface du cuivre, il ne joue aucun rôle de masque pour la « tranche » du cuivre gravé ; on risque donc une attaque latérale des pistes par leur tranche, appelée « surgravure ». Un bac de rinçage à grande eau doit être à portée de main pour immersion rapide des cartes sortant du bain de gravure. On arrête ainsi instantanément la réaction d'attaque du cuivre par le bain. Si l'on tarde à effectuer ce rinçage, les pistes risquent d'être dentelées et les trous d'être trop grands.

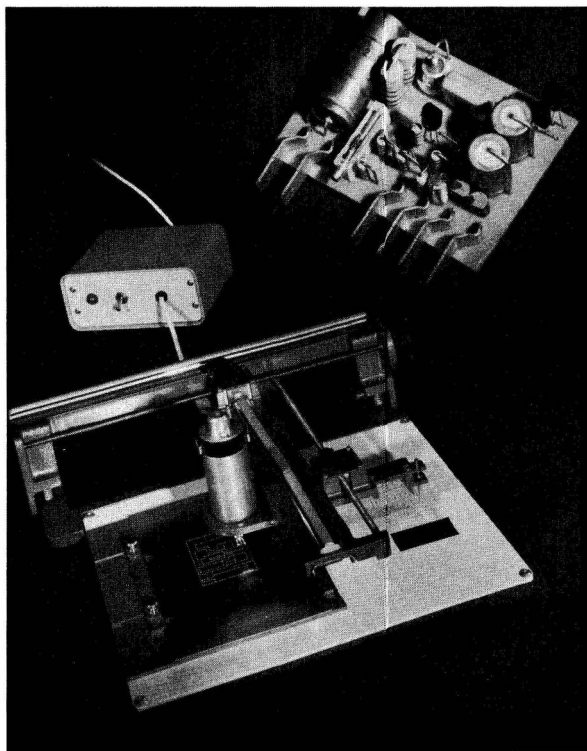
Le vernis masque pourrait alors être éliminé, mais il est préférable de le conserver pour l'instant, afin de protéger le cuivre sous-jacent. Il faudra percer des trous dans la carte, et la présence du vernis jouera un rôle de protection au moment de perforer le circuit. Si l'on n'a pas cependant prévu les emplacements des trous lors de la confection du masque, c'est le moment de les repérer au moyen d'une pointe sèche. N'insistez pas trop en marquant le masque, pour ne pas érafler le cuivre sous-jacent.

Le perçage demande beaucoup de soin, du fait que la plupart des trous doivent être faits avec des mèches très fines. Dans la plupart des cas, une mèche de 0,9 ou 1 mm est suffisante. Si l'on en achète, il vaut mieux les acquérir par quantité de 3 ou 4 pour tenir compte de la casse éventuelle. Lorsqu'on perce de la fibre de verre, la mèche s'use très rapidement. Les perceuses électriques à main ne peuvent être utilisées à cause du risque plus important de cassure des mèches ; on peut à la rigueur utiliser une perceuse électrique montée sur bâti.

On percera tous les trous à cette dimension, dans un premier temps ; ensuite, on agrandira au diamètre voulu tous les avant-trous ainsi obtenus, et correspondant par exemple à l'implantation de potentiomètres, vis de fixation, résistances bobinées, transformateurs et bobinages maintenus par leurs soudures sur le circuit. Les transistors de puissance en boîtiers métalliques auront besoin de fils rapportés de gros diamètre ; on n'oubliera pas, à ce propos, de prévoir les fixations des dispositifs de refroidissement des composants. On mesurera soigneusement le diamètre des mèches de perçage pour les trous destinés à recevoir les plots ou les traversées auxiliaires de câblage. Bloquer correctement le circuit sur la table de perçage pour éviter tout accident à vous-même comme au circuit.

Les mèches provoquent des bavures, surtout lorsqu'elles sont émoussées. On les éliminera en régularisant à la main l'entrée des trous au moyen d'une mèche de diamètre beaucoup plus grand, de manière à obtenir un chanfrein. Ceci est particulièrement important aux endroits où l'on montera des transistors en étroit contact avec le circuit, par l'intermédiaire d'une rondelle isolante de mica. On prendra soin de ne pas arracher, par maladresse, le cuivre du circuit, pendant les opérations de perçage et de placer celui-ci face cuivrée vers le haut. Si une coupure, ou une amorce de rupture, apparaît sur une piste, il faut enlever localement le vernis de masquage et réparer en soudant un fil réalisant un pontage par-dessus le défaut constaté.

L'élimination du masque est relativement facile, mais les méthodes dépendent du type de vernis utilisé. Les diluants ou solvants nécessaires doivent être à portée de main. Si l'on a utilisé des « transferts » adhésifs, il n'y a pas de problème particulier et l'on peut passer à l'étape du nettoyage. On n'insistera jamais assez sur l'absolue nécessité de



Cette machine peut graver dans le cuivre une implantation à partir d'un dessin à angles droits. L'outil de coupe trace des sillons dans le cuivre, et réalise des îlots d'interconnexion. Cette même machine est capable de réaliser ensuite les perçages. Aucune gravure chimique n'est nécessaire. (Document West Hyde Developments Ltd.).

nettoyages parfaits entre les étapes de réalisation du circuit imprimé, pour en assurer la qualité finale. Toute contamination due à des produits gras, ou aux empreintes de doigts produirait des défauts lors de la soudure des composants. On emploiera chaque fois la paille de fer très fine et/ou un décapant ménager (lessive ou liquide). Le cuivre perdra son aspect brillant, mais cela n'a aucune importance, pourvu qu'il soit propre. Il n'y a d'ailleurs pas de raison particulière nécessitant son polissage.

Lorsque la carte a été soigneusement percée et nettoyée, on la sèche avec un chiffon, en vérifiant qu'aucune peluche ne s'accroche au circuit. Un séchage à l'air libre en atmosphère dépoussiérée est préférable.

On dispose maintenant du circuit, prêt pour l'insertion des composants. Il est cependant préférable d'enduire le circuit avec un flux spécial pour soudure. On peut obtenir ce produit auprès des fabricants de soudure ; on le vaporise sur la carte, ou bien on l'étale avec un petit pinceau ; on prendra soin de déposer une couche relativement mince, pour qu'elle sèche rapidement et ne pose pas de problème lors de la soudure ultérieure. Le but de cette enduction est d'abord de protéger le cuivre d'une oxydation prématurée ou de ternissures, et de faciliter la soudure des composants. On fera des « réserves », ou protections par adhésif, au niveau des emplacements destinés à jouer le rôle de connecteur encartable, s'il y a lieu. Ultérieurement ces zones pourront être trempées dans un bain de dorure. Le flux est un produit à base de résine epoxy polyimide.

Une autre méthode de protection du cuivre est son étamage. Ce procédé industriel est tout à fait à la portée de l'amateur.

Étamage

Trois méthodes d'étamage sont applicables ; il s'agit du *rouleau*, du *trempe* et de la *vague*. Dans les trois cas on utilise un bain de soudure à 235°C. La méthode au rouleau a été employée pendant longtemps, mais elle est maintenant dépassée par la méthode à la vague. En effet, si le rouleau est contaminé par des impuretés quelconques, ou des souillures, la pellicule d'étain risque de ne pas se transférer du rouleau au circuit. Quant à la méthode au trempé, les résultats qu'elle donne sont plus ou moins réguliers, mais elle est cependant la seule vraiment accessible à l'amateur, puisqu'elle ne fait appel à aucun outillage compliqué.

Le bain aura une surface libre un peu plus grande que celle de la carte à traiter. La profondeur du bain doit être au minimum de 6 à 7 mm. Il faudra donc une quantité relativement importante de soudure, ce qui n'est pas très économique (augmentation constante des prix des métaux). Il existe divers types d'alliages susceptibles d'être utilisés par l'amateur. Le meilleur choix est certainement l'étain-plomb dans les proportions 60/40, dont le dépôt sur l'ensemble des pistes du circuit atteindra environ 20 microns. Cette épaisseur jouera un rôle protecteur tout à fait suffisant dans la plupart des cas et aidera grandement à la soudure des composants.

Il ne faut pas excéder cette épaisseur d'étamage, surtout lorsque les largeurs des pistes et leur écartement sont critiques. On peut opérer une refusion de l'étain déposé, pour en régulariser la répartition sur le

cuivre, bien que dans certains cas cela ne soit pas très souhaitable (contraintes thermiques) ; l'utilisation de soudure d'appoint devra de toute façon intervenir lors de l'insertion des composants.

L'étamage à la vague est généralisé dans l'industrie surtout du fait des faibles dimensions des pistes et de leurs espacements. La précision des temps de gravure est directement reliée à la régularité du dépôt d'étamage. La quantité d'étain déposée entre pour une part non négligeable dans le prix de revient de la carte, dans le cas de la fabrication de grandes séries.

On doit observer les mêmes règles de propreté en ce qui concerne l'étamage ; la moindre souillure sur le cuivre détruit sa « mouillabilité » lors de l'étamage. On contrôlera le dépôt de flux pour y détecter des vides ou des bulles éventuels ; dans ce cas, il faudra effectuer de légères retouches au pinceau, pendant que le flux est encore humide. On doit prendre garde que les trous ne soient pas obstrués par le flux, sinon des difficultés pourraient apparaître lors de l'insertion des composants.

Si l'on utilise une carte double face, il faudra l'immerger totalement dans le bain de soudure, pour assurer l'étamage des trous métallisés. Si une seule face du circuit doit être étamée, on se limitera à celle-là, sans commettre d'excès de zèle. L'étamage à la vague a pour avantage de réduire les risques d'étamage aux mauvais endroits d'un circuit. La méthode au rouleau est inefficace pour les circuits « double face », car la soudure ne pénètre pas dans les trous métallisés.

L'étamage à la vague se pratique en faisant défiler le circuit imprimé au ras d'un bain d'étain à la surface duquel une ride de soudure est formée, par entraînement ; cette ride vient effleurer la carte sur toute sa surface et réalise l'étamage.

Il apparaît souvent à la surface des bains d'étamage une sorte d'écume rassemblant les impuretés du métal, remontant à la surface sous l'effet de la chaleur ; on doit soigneusement « écrémer » le bain pour éviter tout contact de ces impuretés qui risquent de s'accrocher au cuivre et d'empêcher un étamage correct.

Des imperfections d'étamage peuvent résulter de gaz occlus dans le bain de soudure, du refus au mouillage par l'étain, ou d'impuretés contenues dans ce dernier ; les ternissures du cuivre sont aussi fautives. On inspectera avec soin la surface de la carte et si des défauts trop importants apparaissent, on brossera énergiquement le circuit et l'on recommencera l'étamage. Il faut écumer soigneusement le bain d'étain. De petites piqûres dans l'étamage ne sont pas critiques, à condition qu'elles ne soient pas trop nombreuses, ni localisées au même endroit. Ne pas tenter de reprendre en main le circuit avant qu'il ne soit refroidi. S'il est absolument nécessaire de le manipuler, on ne le fera qu'avec des gants de protection (amiante par exemple).

On évitera toute projection d'étain liquide fort nuisible pour les vêtements qui risquent d'être définitivement endommagés, car on ne peut enlever les particules d'étain sans détruire les fibres sur lesquelles elles s'accrochent. Une blouse de protection est impérative. Les brûlures peuvent être pénibles. Si elles sont localisées et peu nombreuses (gouttes giclant sur les doigts), il suffit de tremper les mains dans l'eau pour quelques minutes. Les brûlures étendues et importantes doivent être traitées sans délai par un médecin ; ne pas entourer les brûlures de pansements ni de crèmes sans avis médical.

Pour le refroidissement des cartes, on peut improviser un dispositif à clayettes métalliques (grillage) maintenu sur un support quelconque (plateau). La position verticale est recommandée pour les cartes.

Nous avons vu dans ce chapitre la réalisation de circuits imprimés à l'unité, ou en petite quantité. D'autres procédés et méthodes sont utilisés dans l'industrie. Il en est une qui consiste à fabriquer un tampon encreur, imprimant le circuit désiré sur chaque face de cuivre vierge, au moyen d'une encre résistant aux acides. Le risque en est la répétitivité des imperfections du dessin.

Le procédé industriel le plus à l'honneur est sans doute la méthode photochimique, dans laquelle le cuivre est enduit d'une substance photosensible aux rayons ultraviolets ; on expose ensuite cette couche avec interposition d'un masque représentant le circuit ; on développe la « photographie UV » ainsi réalisée, ce qui revient à éliminer la résine photosensible partout où elle n'a pas été exposée aux rayons UV.

Les produits correspondants sont disponibles sur le marché, et l'amateur peut actuellement aborder ces techniques, s'il fabrique souvent des circuits imprimés.

montage des composants

Du fait du volume énorme de composants disponibles sur le marché, dont les types se comptent par dizaines de milles, l'amateur reste perplexe lorsqu'il doit choisir celui qui remplira au mieux sa fonction. Les livres et les magazines peuvent le guider dans cette jungle. Les fabricants et les revendeurs publient aussi des catalogues qui se révèlent très utiles, dans le choix des types et des caractéristiques des composants.

Dans ce chapitre, nous nous intéresserons au montage et à l'insertion des composants sur le circuit imprimé. Avant d'entrer plus avant dans le sujet, nous nous pencherons sur l'outillage nécessaire, car il ne souffre pas la médiocrité. Le manque de soin dans leur utilisation serait aussi la cause de déboires qui ne se révèlent qu'à la mise sous tension du circuit. Il est courant par exemple d'abîmer une pince destinée à courber les fils de câblage, en lui faisant jouer le rôle de clé dans le serrage des écrous. Le résultat ne se fait pas attendre ; les mors finissent par se tordre ou se briser.

Le proverbe classique « le mauvais ouvrier blâme ses outils » prend ici toute sa valeur. On doit soigneusement choisir son outil en fonction du travail à effectuer ; un travail mal fait ne peut résulter que d'un mauvais choix. L'équipement minimum nécessaire à l'implantation des composants comprend :

- un fer à souder - 12 ou 15 W,
- une pince coupante de côté ou diagonale,
- une pince plate de câblage,
- une paire de tournevis de petite taille,
- de la soudure étain-plomb (60% - 40%) en rouleau, de section 0,7 à 1,5 mm (diamètre).

Il est souvent utile d'avoir par ailleurs :

- du fil de cuivre étamé de section 0,5 à 1 mm,
- de la gaine P.V.C. de 1 à 1,5 mm de diamètre,
- un choix de visserie (boulons et écrous) par exemple 3 - 4 - 5 mm de diamètre. (Métal et nylon pour fixations isolantes),
- du fil de câble isolé P.V.C., de différentes couleurs.

On suppose dans ce qui suit que le circuit est prêt pour l'implantation des composants, les problèmes de perçage ayant été résolus. Si un ou deux composants sont manquants, il vaut mieux attendre de les avoir, surtout si la densité d'implantation est élevée ; il est plus agréable d'être à même de faire le travail en une seule fois que d'être obligé de s'interrompre et d'attendre que les composants manquants soient disponibles. Les conseils qui suivent s'appliquent à presque tous les types de circuits imprimés dont les perçages ont été effectués (les circuits préimprimés sont décrits au chapitre 7).

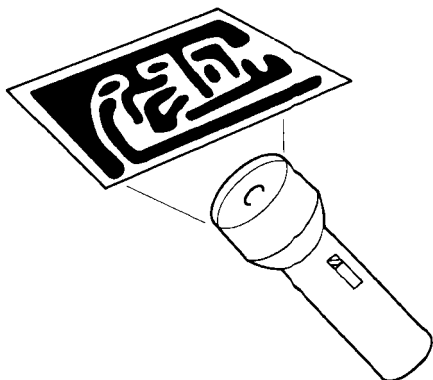


Fig. 23. Détection des fissures ou autres défauts susceptibles de provoquer des anomalies de fonctionnement, au moyen d'une lampe éclairant le côté composants.

Tout d'abord, on vérifiera soigneusement le circuit, afin de s'assurer qu'aucune fissure n'existe dans le cuivre, ce qui compromettrait le fonctionnement du circuit. S'il en existe, on doit les réparer immédiatement, en réalisant un pont de soudure sur la fissure. Pendant cette opération, il faut éviter de boucher des trous du circuit. La figure 23 montre une méthode efficace d'inspection du circuit, au moyen d'une lampe torche, ou d'une lampe de bureau, placée sous le côté composant. Dans le cas où l'on n'est pas sûr d'avoir mis en évidence une fissure, on peut imprimer une très légère flexion au circuit, en appuyant sur le côté composant au moyen d'un crayon par exemple (fig. 24a), pendant cette opération, on teste la continuité de la piste incriminée, au moyen d'un ohmmètre (fig. 24b). On mettra ainsi en évidence un tel défaut, amplifié par la flexion du circuit car la fissure devient « franche » pendant cette flexion.

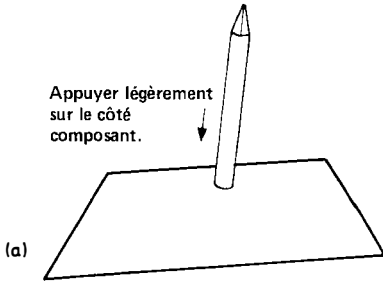


Fig. 24. Si on suspecte l'existence de fissures dans le cuivre, on met la carte en flexion, tout en contrôlant la piste douteuse au moyen d'un ohmmètre.

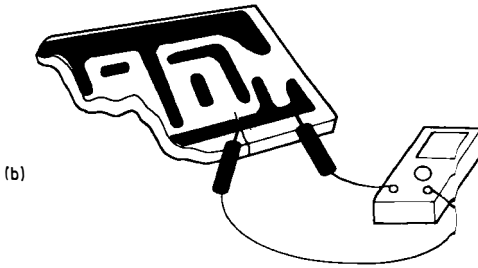


Fig.25. Réparation d'une fissure au moyen de fil étamé.

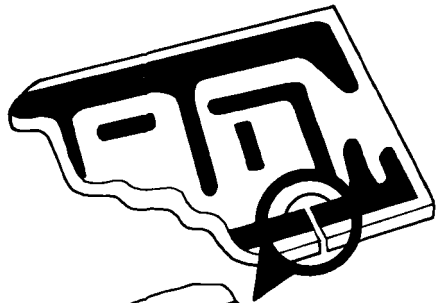
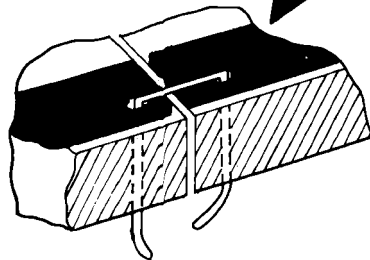


Fig. 26. Réparation d'une cassure au moyen d'une épaisseur de fil de cuivre étamé, passant dans des trous percés près de la cassure, et qui sera soudée à la piste fracturée.



Après avoir mis en évidence la partie endommagée, on peut passer à la réparation, et éviter ainsi de refaire une carte neuve ; cependant, si la fiabilité doit être assurée à tout prix, il vaut mieux refaire un circuit. Si le circuit est fendu sur toute son épaisseur, une réparation efficace peut être entreprise, comme l'indique la figure 26. S'il y a suffisamment de place disponible, on peut perforer de petits trous au voisinage de la coupure, avec une mèche de 1 mm. On passe alors un fil de cuivre dans les trous et on épissure fortement les extrémités de manière à refermer la *couture* ainsi réalisée. On couvre la *reprise* avec la soudure, ce qui donne tenue mécanique et continuité électrique à la réparation.

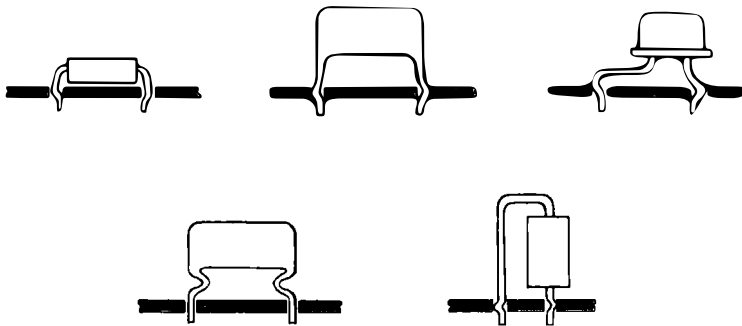


Fig. 27. Composants à queues préformées. Les pliages jouent le rôle de maintien mécanique provisoire, jusqu'à soudure des queues sur la carte.

Les composants passifs, tels que les résistances, les capacités et les petites inductances, dont les queues sont au nombre de deux, sont réalisés sous des formes très diverses, et il est sage d'avoir prévu les perçages du circuit en fonction de leurs dimensions exactes, pour assurer une certaine netteté de l'implantation. On peut obtenir ces composants avec des queues longues ou courtes ; ces dernières sont destinées aux implantations sur circuit imprimé.

Ces dernières années, l'industrie a mis au point des méthodes d'insertion automatique des composants, ces derniers étant livrés avec des queues préformées, c'est-à-dire cambrées d'une certaine manière. La figure 27 donne des exemples de ce qui se fait couramment, pour des résistances, des capacités, des diodes et des transistors. Les queues sont cambrées par le fabricant, et mises à longueur pour insertion directe sur le circuit. Les composants peuvent aussi être livrés en cartoucière, les queues étant alignées avec l'axe longitudinal du composant ; ils sont fixés

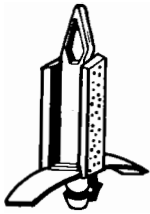
avec un pas régulier sur deux doubles bandes parallèles emprisonnant les queues entre leurs faces adhésives. (fig. 29) La cartouche est enroulée sur un tambour débiteur; le tambour est placé sur une machine d'insertion automatique qui coupe, cambre et place les composants sur les circuits défilant à la chaîne.

Les queues préformées comportent un pliage en « S » de façon à requérir un léger forçage pour être insérés sur le circuit, ce qui donne un maintien provisoire du composant sur le circuit lors de l'opération de soudure. D'autre part, la position de ces pliages détermine la hauteur du composant, au-dessus du circuit. Il semble cependant difficile pour l'amateur d'obtenir de tels composants, et il doit trouver un moyen pour travailler avec ses deux mains... et un support, puisque le composant, la soudure et le fer à souder sont concernés par l'opération. Le moyen le plus simple est d'écarter à 45° les queues des composants par rapport au plan du circuit en les éloignant l'une de l'autre, après insertion dans les trous prévus. Les composants sont ainsi solidement tenus pendant leur raccordement par soudure. (Il sera par contre difficile de les enlever, les queues ayant été coupées, en cas de modification). La figure 30a montre cette manière d'opérer. Certains composants sont maintenus sur le circuit par l'intermédiaire de leurs queues seulement; nous verrons en détail le cas de ceux qui requièrent des dispositifs de tenue mécanique; pour l'instant nous examinerons la manière de procéder à l'implantation des composants.

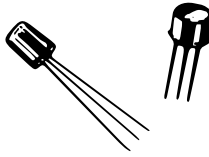
Certains composants sont de dimensions très importantes par rapport à d'autres, qui se trouvent ainsi « enclavés » sur le circuit; c'est la raison pour laquelle il faut commencer par implanter les composants de petite taille, pour terminer par les plus gros. On doit vérifier que tous les percages ont été faits, car il se peut qu'une intervention mécanique sur le circuit s'avère impossible lorsque l'implantation est presque terminée.

La première étape consiste à monter les fils de liaison du côté composant. Les liaisons courtes seront réalisées en cuivre étamé; les liaisons plus longues seront faites avec du fil isolé sous P.V.C... La ligne droite est conseillée comme chemin de liaison d'un point à un autre du circuit. Lorsque les deux extrémités du fil ont été introduites dans les trous qu'il doit relier, on les plaque sur le cuivre. On peut les souder à ce moment, ou plus tard, suivant que l'on préfère souder immédiatement après chaque insertion, ou réaliser toutes les soudures une fois que toutes les insertions ont été effectuées. Il faut remarquer que le risque de boucher accidentellement des trous n'est pas négligeable lorsqu'on applique la première méthode; d'autre part, si l'on applique la seconde, on peut facilement corriger une erreur jusqu'au dernier moment avant la soudure.

Le raccordement des liaisons par fil est un bon exercice avant de s'attaquer aux composants qui nécessitent un bon entraînement et de la rapidité, pour ne pas leur infliger des chocs thermiques trop importants.



Entretoise de montage



Transistors



Afficheur numérique.



Potentiomètre.



Potentiomètre ajustable.



Circuit intégré à boîtier DIL.



Circuit intégré à boîtier TO-5



Connecteur femelle pour carte.



Capacité.

Fig. 28. Composants destinés à être implantés sur circuit imprimé.

On passe aux picots, plots, traversées et fils souples de liaison aux alimentations ou à d'autres ensembles entrant dans la réalisation projetée (haut-parleurs, lampes, panneau de commande). Leur insertion, ou raccordement, est plus commode à ce stade, car la carte n'est pas couverte par les composants. La figure 30f montre un plot implanté sur un circuit; le trou d'insertion doit être correctement calibré, pour éviter toute fissure dans son voisinage.

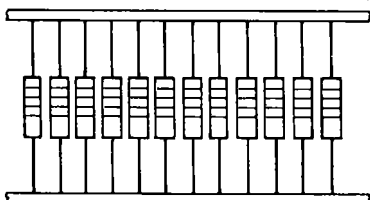


Fig. 29. Cartoucière de composants.

L'étape suivante sera consacrée à l'insertion des résistances, diodes de signal, ou composants de taille analogue. Certaines capacités sont de dimensions très réduites, mais il est préférable de les implanter plus tard. Chaque fois qu'un composant est implanté, on le coche sur la liste (ou nomenclature), de façon à savoir où l'on en est, en cas d'interruption momentanée du travail.

La figure 30 montre les façons orthodoxes et incorrectes d'implanter les composants. La partie gauche montre les erreurs les plus communes, fortement exagérées. Au mieux, de telles erreurs altèrent la présentation d'ensemble du circuit terminé; au pire elles peuvent endommager les composants. La partie droite de la figure indique la manière correcte de procéder.

La figure 30a montre le mauvais traitement que l'on risque d'appliquer à une capacité, dans le cas où l'intervalle entre les trous prévus sur le circuit pour l'implantation sont trop grands. Les queues risquent d'être arrachées, ou le revêtement de la capacité risque de se casser. On peut, avec une pince, plier les queues pour faciliter leur insertion, dans le cas où le perçage n'est pas à la cote exacte. On a représenté aussi sur cette même figure, (partie gauche) une soudure défectueuse, due à une rétention de flux ou à une salissure du cuivre. Normalement, la soudure doit remonter dans le trou de manière à réaliser un ancrage efficace du composant. La partie droite de la figure 30a montre les extrémités des queues du composant légèrement coudées, les trous correctement espacés et des soudures selon les règles de l'art.

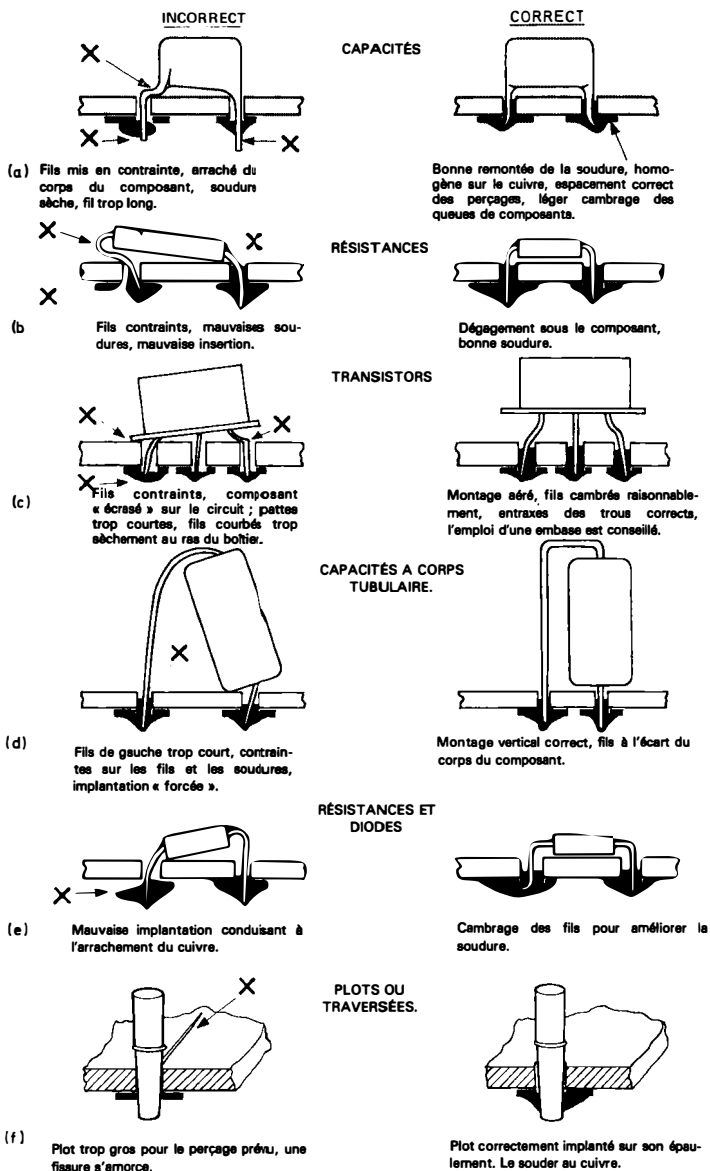


Fig. 30. Bonnes et mauvaises méthodes de montage des composants.

La figure 30b montre une résistance. La dimension du composant est à l'évidence démesurée par rapport à l'entraxe des trous prévus à son intention sur le circuit ce qui oblige à écraser le fil pour plaquer le composant sur le circuit ; le risque de cassure de la résistance du côté de ce pliage brutal est très grand. On notera, en regard, sur la partie droite de la figure 30b qu'un certain clair est laissé entre la résistance et le circuit ; cela est recommandé pour les résistances dissipant plus de 1 W, les résistances bobinées devront être encore plus surélevées au-dessus du circuit imprimé. Lorsque la proximité de queues de composant le nécessite, on munira ces dernières de gaines isolantes en P.V.C.. La figure 30d montre une capacité montée verticalement, avec des risques de court-circuit entre les queues et l'enveloppe, généralement métallique dans le cas des condensateurs électrolytiques. Des contraintes supplémentaires sont imposées à la partie inférieure du composant (partie gauche de la figure).

On doit éviter le chauffage prolongé du cuivre lorsqu'on effectue une soudure pour éviter un décrochage du cuivre de son substrat.

Les transistors de petites dimensions doivent être montés en suivant leur disposition de pattes, possédant généralement un axe de symétrie. On choisira cependant un système de perçage de dimensions légèrement plus grandes que les écartements des pattes à leur sortie du transistor, et on pliera légèrement vers l'extérieur ces dernières pour insérer le transistor sur le circuit, en évitant de créer un coude brutal au ras du transistor.

Il est d'ailleurs sage de monter les transistors sur une embase ; celle-ci joue le rôle de support et d'entretoise fixant la hauteur du transistor au-dessus du circuit. En cas de choc accidentel, on ne risque pas de courts-circuits pattes-boîtier, ou entre pattes. La figure 30c montre ce qu'il faut faire et ne pas faire. On ne doit pas cambrer les queues de diodes ou les pattes de transistors à moins de deux ou trois millimètres de leur ancrage sur le composant, afin de ne pas créer de contraintes destructives à la transition entre le composant et le fil qui en sort.

On laissera longues les queues des composants jusqu'à ce qu'ils soient tous définitivement soudés en place. On bénéficie ainsi d'une capacité thermique très commode au moment de la soudure ; on peut ajuster la longueur après soudure de manière à assurer une bonne répartition de l'étain-plomb par capillarité sur la queue du composant.

Bien que les transistors et les circuits intégrés soient de petite dimension, et que selon les principes énoncés plus haut ils doivent être insérés au début de l'implantation des composants, il est préférable de réaliser cette opération en dernier lieu, parce qu'ils sont très sensibles aux flux thermiques généreusement appliqués par le fer à souder. Il est préférable d'utiliser des embrases de connexion par contact, servant de transition entre les composants et le circuit. L'avantage est évident lorsqu'il s'agit de remplacer un de ces éléments ; mais des risques

d'instabilité en haute fréquence peuvent résulter de la dégradation des contacts avec le temps. Dans certains cas, on peut provisoirement utiliser des embases pendant la mise au point (remplacement d'un transistor par exemple) et souder les composants actifs définitifs lorsque tout marche normalement. De toute façon, les problèmes qui se posent pour dessouder un composant à grand nombre de pattes sont toujours ennuyeux à résoudre. la destruction thermique de ce dernier étant généralement la conclusion de l'opération, si elle dure trop longtemps.. On a tout intérêt à vérifier qu'un composant de prix élevé est opérationnel avant d'appliquer la moindre goutte de soudure sur ses pattes, car le recours auprès du fournisseur n'a aucune chance d'aboutir en cas de défaut constaté trop tard, c'est-à-dire après que le composant a été soudé sur un circuit et a fortiori laborieusement dessoude.

Blindages

Un des avantages du circuit imprimé réside dans la facilité d'implantation d'écrans métalliques qu'il autorise. On peut placer des cloisons verticales maintenues au niveau de leur pliage par des plots ou des fils de cuivre étamé de diamètre convenable, implantés dans le circuit imprimé comme des queues de composants et reliés électriquement à la masse, ou au plan de masse du circuit. On peut envisager tout aussi bien des écrans disposés horizontalement, parallèles au circuit et maintenus par des entretoises.

On peut utiliser des feuillards de cuivre, ou des morceaux de circuit imprimé vierge ; l'emploi de verre epoxy cuivré d'un seul côté permet de faire des écrans dont un côté est isolant, ce qui autorise la proximité de liaisons électriques sans risques de court-circuits avec la masse. On peut fixer ces écrans, lorsqu'ils sont perpendiculaires au plan de masse, et à son contact, en réalisant un joint de soudure à leur raccordement avec le plan de masse, on peut enfin unir entre eux des écrans au moyen de simple vis autotaraudeuses, ou par boulons et écrous.

Soudures

A part les fissures du cuivre ou les défauts du substrat, les soudures défectueuses sont une cause non négligeable de défauts de fonctionnement du circuit terminé. Les méthodes industrielles sont appliquées sous un contrôle rigoureux, puisque la fiabilité du produit est de première importance. L'amateur quant à lui, applique les procédés les plus économiques, même s'ils sont parfois contraires aux règles de l'art. Le défaut le plus courant est la soudure sèche, résultant de la contamination avant soudure des parties à assembler. On ne peut, une fois de plus, qu'insister sur la nécessité de travailler avec le maximum de

propreté, et de mettre au rebut les composants dont les queues ne sont pas parfaitement nettes.

Les cartes enduites de flux peuvent être soudées au fer et au fil d'étain-plomb (bobine). En aucun cas on n'utilisera de la soudure à décapant acide incorporé. Le fer à souder ne doit pas être trop gros ou trop puissant pour ne pas endommager le cuivre. Une puissance de 15 W est confortable ; sur des pistes extrêmement fines, une puissance de 10 à 12 W suffit largement. Les pannes de cuivre protégées par un revêtement de fer ont une durée de vie plus importante ; les pannes en céramique sont intéressantes en cas de fuite électrique risquant de se produire entre le fer à souder et les entrées sensibles des circuits que l'on soude sur le circuit imprimé.

Professionnellement, on utilise la soudure à la vague, décrite tout au début de cet ouvrage. Cette méthode reste inaccessible à l'amateur.

Connecteurs

Les connecteurs de cartes sont tout à fait conseillés pour réaliser la liaison d'un ensemble de points d'un circuit imprimé avec ceux d'un autre circuit. Les matériels constitués d'un grand nombre de *cartes électroniques* emploient une grande variété de tels connecteurs. Le démontage et la maintenance des équipements ont été grandement simplifiés par ce mode d'assemblage. Généralement, les connecteurs de carte réalisés en *encartable* (langues de connexion créées sur le circuit imprimé lui-même) sont dorés, ce que ne peut se permettre l'amateur. On peut protéger de tels contacts, lorsque le circuit est en stockage, au moyen de bande adhésive. Au bout d'une certaine durée de fonctionnement ils finissent toujours par s'oxyder superficiellement.



techniques de réalisation industrielle

On trouve des fabricants prêts à réaliser des circuits imprimés en petite quantité, ou même à la pièce ; mais cela reste assez onéreux. Comme pour toute fabrication industrielle, le prix des outillages ne peut être amorti que sur une quantité importante de pièces. En faisant réaliser un circuit par un fabricant, on devra supporter le coût total de production ramené à une seule pièce. Les délais, d'autre part, dépendent de la charge et des en-cours du fabricant. Pour un seul circuit, il peut être possible de profiter d'un trou entre deux commandes ; mais pour un lot de quelques circuits, il faudra sûrement attendre un certain temps, surtout si l'on demande au fabricant de réaliser aussi tous les perçages.

La fabrication d'un circuit imprimé étant chère, il vous faudra être sûr de votre maquette avant de la « lancer ». Toute modification, même mineure du point de vue électronique peut vous conduire à la fabrication d'un nouveau circuit.

La fabrication des circuits imprimés fait appel à une ou deux méthodes d'emploi relativement généralisées. Pour des besoins particuliers, il en existe d'autres permettant de soigner la précision ou de satisfaire des spécifications sévères. Ces deux méthodes sont la sérigraphie et la photogravure.

L'emploi de pochoirs métalliques est bon marché, mais il n'est valable que pour de petites séries ; le pochoir en effet s'empâte de vernis masquant assez rapidement et le dépôt de vernis sur le cuivre vierge s'écarte notablement de l'original de référence. Cette méthode ne convient pas du tout pour des circuits comportant un grand nombre de pistes très proches. Il ne faudrait pas pour autant l'éliminer complètement, car elle est à considérer pour des quantités faibles.

La photogravure consiste à transformer le circuit, côté cuivre, au moyen d'un vernis, en plaque photographique sensible à l'ultra-violet. Le dessin d'implantation (négatif) est interposé entre la source ultraviolette et le circuit; lors du développement les parties exposées du vernis photosensible restent en place, et constituent le masque de gravure du circuit.

Le choix entre les diverses méthodes dépend d'un grand nombre de considérations. Pourtant celles relatives au prix de revient l'emportent souvent, mais ne coïncident pas toujours avec la facilité de réalisation. On peut lire ci-après les facteurs à prendre en compte dans une étude de réalisation industrielle.

Dimensions

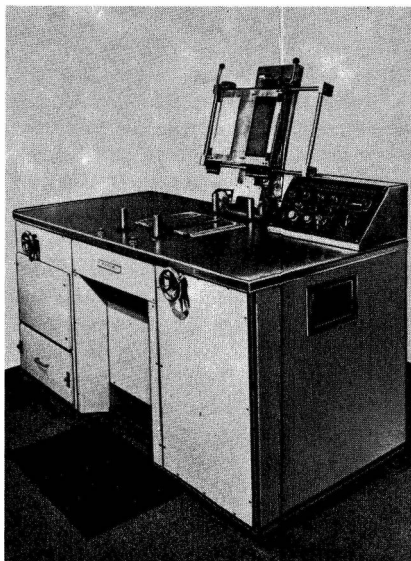
Taille de l'implantation, possibilité de « compression » de l'implantation, taille des composants; l'estimation du taux de panne ou de rejet résultant de la miniaturisation des composants, et de la largeur des pistes est nécessaire, ainsi que l'étude du coût des outillages de précision, et de la découpe optimale des matériaux de départ.

Formes

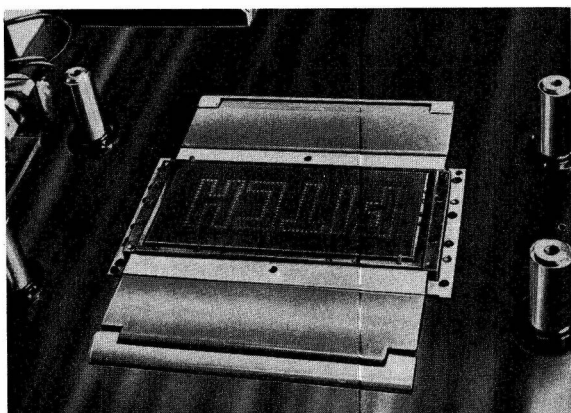
Les circuits, autant que possible, doivent être rectangulaires, les découpes de forme spéciale doivent pouvoir être effectuées facilement; on n'oubliera pas qu'un outillage de découpe spécial ajoute au prix de fabrication du circuit. L'angle droit est recommandé pour de telles formes ou découpes supplémentaires; on essaiera donc d'en simplifier au maximum les contours.

Matériaux

Le choix se résume à l'alternative papier imprégné ou verre epoxy. Les caractéristiques en ont été données au chapitre 2, afin de faciliter la décision. Les qualités mécaniques sont prépondérantes dans le cas de cartes utilisées en tant que support; elles sont en effet soumises à rude épreuve lorsqu'elles sont chargées de composants lourds ou volumineux, et que des contraintes thermiques leur sont appliquées; lorsqu'une finition au moyen d'outils manuels est envisagée, il faudra prévoir la solidité du circuit en conséquence. Les cartes peu épaisses devront être munies de pistes de cuivre « extra-fortes », admettant une flexion importante. Un « double face » est peut-être à envisager pour assurer un confortable plan de masse.



1. Machine de perçage multibroches. (Document Multi Circuit Drills Ltd.).



2. Table de perçage avec circuit en place. (Document Multi Circuit Drills Ltd.).

Perçages

Les perçages consomment du temps, de l'argent... et des mèches, surtout dans le cas de circuits en fibre de verre. On tentera de conserver une seule dimension de perçage pour tous les trous, ou tout au moins un nombre limité de calibres. La dimension la plus courante est le diamètre de 1 mm. On rencontre aussi des perçages à 0,6 ; 0,8 ; 1,3 mm ; on aidera le fabricant en disposant les perçages conformément à la matrice standard, ou grille au pas de 2,54 mm, utilisée dans l'industrie.

On posera la question de savoir si des trous métallisés sont nécessaires. On s'assurera que les pastilles de cuivre autour de ces trous ont un diamètre raisonnable, ainsi qu'un espacement de l'une à l'autre au moins égal à 2,5 fois leur diamètre (de bord à bord). Les machines utilisées dans l'industrie peuvent traiter plusieurs circuits simultanément et réaliser plusieurs trous à la fois sur chacun d'eux. (Perçage dit « numérique », car il fait appel à des moyens informatiques, fonctionnant grâce à un programme de commande numérique).

Aspect général de l'implantation

Le fabricant décidera à quel procédé il fait appel au vu de la physionomie d'ensemble du pastillage qu'on lui présente. Il acceptera peut-être de donner à votre implantation le « fini » nécessaire, ou reprendra complètement l'implantation à partir de votre « brouillon » (pardon pour l'amateur...); dans ce cas, attention au prix. Les conseils donnés dans ce livre ont pour but de vous éviter une telle situation ; il est aussi avisé de discuter avec le fabricant au moment où l'on implante le circuit sur papier, ce qui permettra sans doute de lui faciliter la tâche.

On évitera les implantations acrobatiques ou étouffées, et les pistes trop proches. Au moyen d'encre de Chine ou de film plastique adhésif, fixés avec une vaporisation de vernis transparent et mat, on peut améliorer efficacement le pastillage. Des erreurs éventuelles peuvent être rattrapées au moyen de vernis blanc opaque, si on désire ne pas trop les mettre en évidence (peu visible en réflexion, *noir* en transparence). Ne pas omettre de dessiner une étiquette d'identification, ou un numéro, sur le pastillage, dans un endroit où cela est compatible avec le fonctionnement ultérieur ou le montage du circuit.

Les repères topologiques peuvent être imprimés sur le circuit par sérigraphie, à l'encre blanche ou noire, du côté composant. Un plan de sérigraphie sur feuille calque, réalisé par exemple au moyen de lettres-tranferts auto-adhésives, sera nécessaire au moment de la fabrication. Il est utile de prévoir une marge de 20 mm autour du plan de sérigraphie.

Les dimensions hors-tout du circuit seront indiquées, de même que ses limites. La photo-réduction du plan de perçage pourra être effectuée par le fabricant ; il est souhaitable de dessiner l'implantation à l'échelle 2, pour obtenir une bonne précision et une définition satisfaisante après réduction. Les implantations très complexes seront dessinées à une échelle encore plus grande. Les lignes de découpe seront dessinées en tenant compte de l'épaisseur de la lame de scie.

Découpe

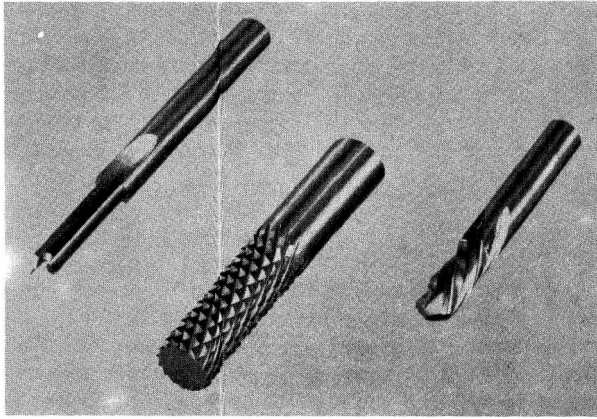
Le fabricant découpe les circuits au moyen d'une scie à dents de diamant ou de carbure de tungstène. Une marge de 2,5 à 3 mm sera prévue pour l'épaisseur de la scie. Les scies ordinaires ne conviennent pas car elles s'usent très rapidement. On peut les utiliser pour de petites dimensions, et pour des formes rectangulaires ; des poussières de fibre de verre sont projetées dans le voisinage du poste de travail, et il est dangereux de les respirer ; on se protégera avec un masque filtrant, lorsqu'on scie à la main des morceaux de verre epoxy.

Un meilleur moyen de découpe consiste à utiliser un outil emporte-pièce. On réduit ainsi les déchets susceptibles de se répandre n'importe où, mais on risque d'abîmer le circuit sur les bords ; des craquelures et des délaminages peuvent résulter de ce mode de découpage. La solution la plus satisfaisante est la découpe par meulage. Elle est d'ailleurs souvent préférée aux deux autres.

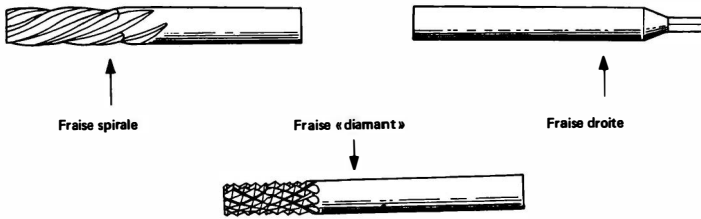
Le sciage ou le meulage peuvent être effectués en se guidant sur des marques tracées sur le circuit, dans le cas où la précision demandée n'est pas importante. Pour de grandes séries, un outil de découpe est nécessaire. Des pions de maintien du circuit sont fixés sur cet outil, de manière à placer avec précision le circuit sur l'outil de découpe. L'outil est lui-même déplacé sur la table de coupe en se guidant sur des sillons ou des glissières. Deux trous au moins sont nécessaires sur le circuit, dont le diamètre doit être de l'ordre de 2 mm ou plus, pour le passage des pions ; la précision de perçage de ces trous doit aussi être en rapport avec celle que l'on désire pour la découpe du circuit. Cet outil sert pour la rectification du périmètre extérieur du circuit imprimé, au moyen d'une fraise.

Finition

Le traitement définitif du circuit imprimé devra être défini assez tôt. Si l'on en reste à l'enduction de flux par vaporisation, il n'y a pas de problème, mais si des portions du cuivre doivent en être protégées, particulièrement pour un placage, on doit le faire à temps, au moyen d'un masque spécial.



Outils de coupe pour dresser les bords du circuit. A gauche : dégrossissage ; au centre : outil à coupe « diamant » anti-bavures ; à droite : mèche pour perçage. (Document Dymet Alloys Ltd.).



Du strict point de vue de la soudabilité, l'étamage à l'étain-plomb est suffisant, dans le cas notamment où le circuit comporte des trous métallisés. Ce revêtement est suffisant comme mouillant pour la soudure des composants, et comme protection des pistes, pour environ 6 mois en atmosphère normale, à 20° ou 25°C et à 50 ou 75% d'humidité relative. L'étamage étain-plomb peut être refondu, au moyen d'un contact avec un bain à 235°C ; on doit surveiller qu'il n'y a pas de rebouchages des trous devant recevoir les queues de composant. Le dépôt de cuivre électrolytique sur les pistes est excellent pour la mouillabilité par la soudure, mais pour une courte durée, à moins qu'un produit de rajeunissement du cuivre ne soit ultérieurement utilisé. Le cuivre peut être protégé aussi au moyen d'une vaporisation de vernis composé de colophane et de polyméthacrylate de méthyle ou d'éthyle.

Les contacts créés sur la carte (connecteur encartable) présentent une faible résistance ohmique lorsqu'ils sont dorés, mais les enfilages

répétés usent rapidement le placage. Une épaisseur de 2,5 microns est courante pour ce genre de traitement de surface ; malheureusement, les soudures sur couche dorée sont fragilisées par la diffusion de l'or dans l'étain-plomb.

Le nickelage assure une bonne soudabilité mais pour une durée limitée. L'alliage étain-nickel est peut-être un peu plus efficace, mais reste moins bon que l'étain-plomb. On peut en atteindre la qualité au moyen d'un alliage d'étain et de nickel, recouvert d'une couche d'or de 1/10 de micron, mais comme le nickel contient du phosphore, en quantité relativement importante, la conductivité obtenue n'est pas excellente. Sa dureté est cependant appréciée pour les connecteurs encartables et les contacteurs. Un placage superficiel d'or améliore la résistance du contact. Le dépôt de nickel est de l'ordre de 6 à 10 microns, tandis que la couche d'or présente une épaisseur de 2,5 microns seulement. Dans le cas d'atmosphères particulièrement chargées en anhydride sulfureux, un dépôt d'or non poreux de 5 microns au moins est nécessaire. Le nickel seul n'est alors pas recommandé à cause de sa vulnérabilité aux attaques chimiques.

7 circuits préimprimés à usage multiple

Dans certains cas, on peut éviter de réaliser, ou faire fabriquer des circuits imprimés spécifiques. De nombreux types de circuits préimprimés existent sur le marché, qui peuvent répondre à une multitude de besoins. Ces produits vont de la simple carte à trous pastillés aux cartes complexes prévues pour les implantations à grande densité de circuits intégrés.

Le moyen le plus rudimentaire pour assembler des composants consiste à planter des punaises à têtes cuivrées dans une planchette isolante. Cette méthode reste limitée à la réalisation de montages volants, n'utilisant pas de composants miniatures ni de circuits intégrés ; la fuite thermique lors des soudures reste importante.

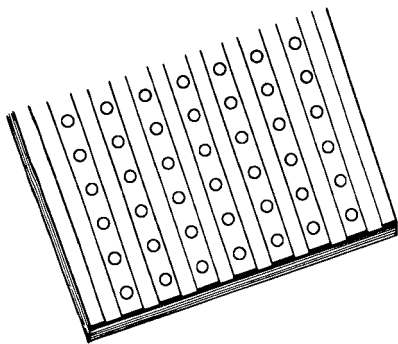
Les plaquettes à cosses sont très pratiques, mais présentent le même genre de limitations. Ce que l'on recherche, c'est un compromis entre ces types de systèmes d'assemblage et les circuits imprimés, comme par exemple une carte pourvue de trous rapprochés, où les connexions s'effectueraient par des fils courant d'un trou à l'autre et soudés aux queues des composants, insérées dans les trous.

Il existe un produit de ce type, comportant sur une face des bandes de cuivre, dont la matrice de perçage est au pas de 2,5 - 3,75 ou 5 mm ; ce produit est appelé Véroboard ; les bandes de cuivre sont régulièrement espacées, et leur largeur est de 1,8 ou 2,5 mm. Pour des réalisations expérimentales courantes, le pas de 3,75 mm est conseillé ; pour celles qui comportent des circuits intégrés, ou des transistors miniature, la grille de 2,5 mm est préférable.

L'amateur peut réaliser au moyen de cette forme de préimplantation modulaire toutes les liaisons qu'il désire entre les composants ; il peut couper et peler les bandes de cuivre, au moyen d'un scalpel, d'une fraise,

ou d'une gouge ; ce faisant, l'amateur peut multiplier le nombre d'îlots de connexion isolés. Des plots peuvent être montés dans les trous pour y souder les fils de liaison vers d'autres cartes. Le Véroboard est fait uniquement de papier imprégné. Le perçage est fait au diamètre de 1 mm pour la grille de 2,5 mm et au diamètre de 1,33 mm pour les autres grilles. Du fait que les bandes sont rapprochées, il faut éviter de laisser baver les soudures hors des bandes, pour ne pas créer de courts-circuits entre ces dernières. Des cartes comportant des préimplantations pour groupes de composants sont aussi fabriquées (voir fig. 31).

Veroboard à bandes



Veroboard à pastilles pour groupes de composants.

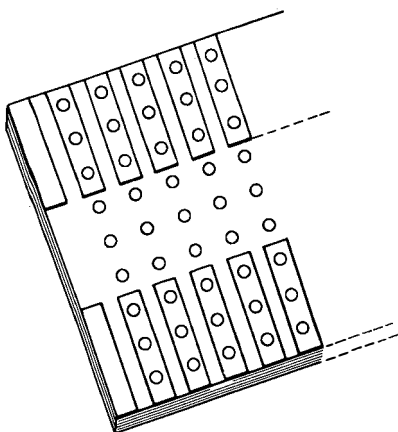
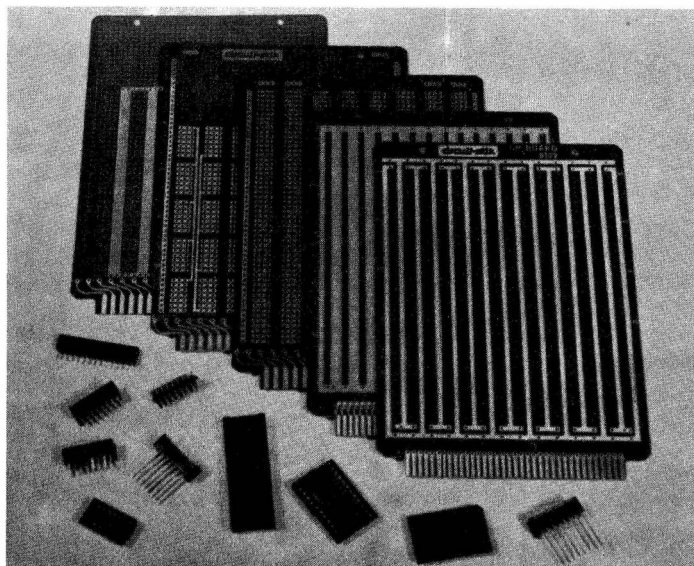


Fig. 31. Deux types de Veroboard à bandes de cuivre. La carte munie seulement des perçages existe aussi.

On peut utiliser des connecteurs de carte avec le véroboard, tout comme on peut créer le connecteur sur la carte elle-même, ce qui est cependant moins fiable. Les principales caractéristiques de véroboard sont données ci-après dans le cas des cartes au pas de 2,5 mm.

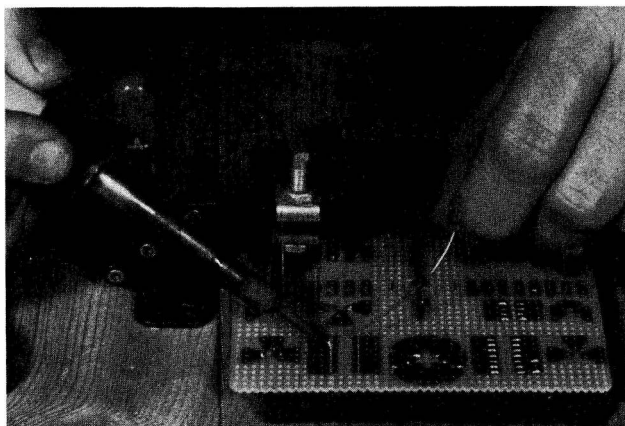
Épaisseur de cuivre	0,1 mm
Intensité maximum pour une élévation de température de 24°C	5 A
Résistance des bandes (avec les trous)	0,018 ohm/cm
Potentiel d'amorçage entre bandes	800 V
Tension maximum d'utilisation	250 V

Certains circuits sont prévus pour le montage de circuits intégrés à boîtiers DIL (Dual In Line, deux rangées de pattes parallèles). Les pastilles sont généralement perforées de trois trous, afin de faciliter les connexions à la même patte de plusieurs composants. Les pistes d'alimentation sont placées entre les rangées réservées aux circuits intégrés, et quelquefois connectées aux pastilles correspondant aux entrées standardisées des tensions continues d'alimentation sur les



Circuits préimprimés destinés à l'implantation de circuits imprimés, conçus suivant des pastillages standards. Noter les bus d'alimentation. (Document Rastra Electronics Ltd.).

boîtiers. Ce dernier point doit être vérifié, au cas où l'on utilise des circuits particuliers, alimentés de manière non standard. Le plan de masse est constitué par une bande de cuivre courant à la périphérie de la carte, de largeur conséquente ; on ne devra pas l'utiliser en *boucle électrique* autour du circuit.



Application de pastilles de cuivre appelées « Circuit stik ». (Document Rastra Electronics Ltd.).

Généralement, les cartes sont munies de pastilles constituant un connecteur encartable, ou prêtes à être soudées sur un connecteur rapporté. Les connexions entre circuits intégrés sont faites au moyen de fils de liaison assez fins. Les perçages sont souvent au pas de 2,5 mm, ce qui est tout à fait adapté aux composants miniaturisés. On peut utiliser les places libres pour câbler des circuits auxiliaires en composants discrets.

Les caractéristiques usuelles de telles cartes, en verre epoxy, sont les suivantes :

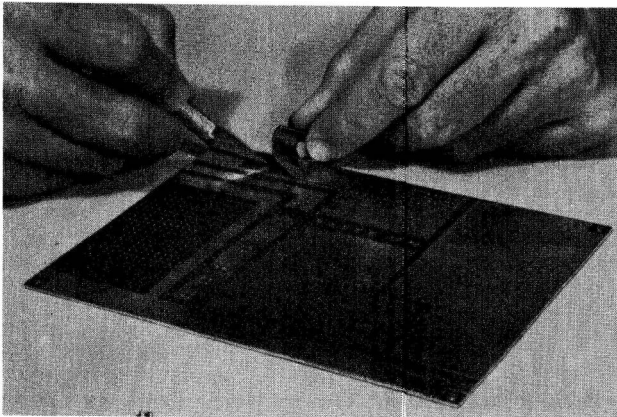
Taille des pastilles à trois trous	1,9 mm
Largeur des pistes entre pastilles	1 mm
Perçage : (diamètre)	1 mm
Étamées au rouleau	
Capacité 11,33,44 ou 66 circuits intégrés.	

Certains fabricants commercialisent des cartes perforées, avec ou sans connecteurs encartés, prévues pour être câblées au moyen de fil de cuivre étamé, que l'utilisateur implante selon ses besoins. La grille de perçage est généralement au pas de 2,5 mm.

Le verre epoxy ou le papier impregné garnis de cuivre laminé sont vendus en épaisseurs de 0,8 - 1,6 ou 2,4 mm.

On trouve aussi des cartes percées et pastillées au pas de 2,5 mm ; l'amateur peut implanter ses composants où il veut sur cette grille, et réaliser le câblage au moyen de fils, ou en profitant des longueurs des queues des composants. Des cartes de ce type avec des trous métallisés sont aussi disponibles. La métallisation du trou est faite au moyen de cuivre électrolytique. Ces cartes sont enduites de flux protégeant le cuivre de toute oxydation.

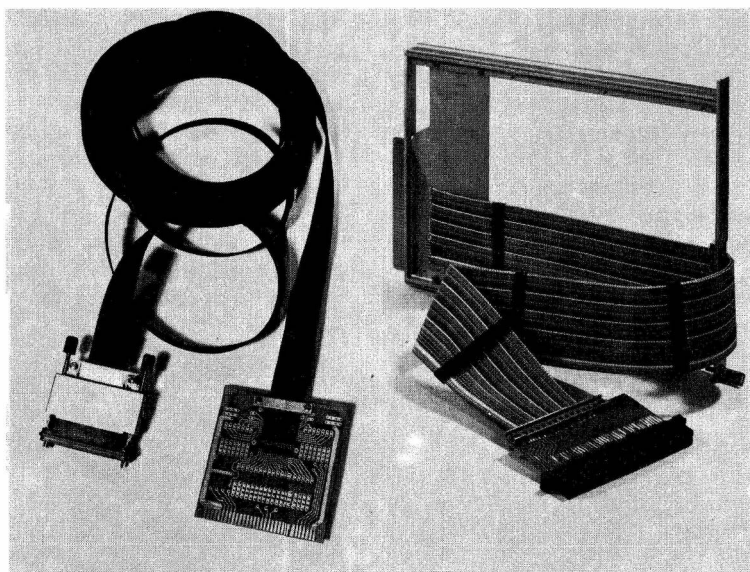
Un autre moyen de réaliser un circuit imprimé consiste à déposer du cuivre laminé adhésif sur un substrat isolant. Le cuivre est conditionné en rouleaux ou en feuilles, permettant de découper des bandes ou des surfaces de contours variés ; il existe des *transferts* de cuivre de formes diverses destinés aux circuits intégrés, (boîtiers DIL ou autres), comme on peut le voir sur les photographies. Pour des formes compliquées et peu usuelles, la méthode par découpe et pelage est utilisable, après *adhésion* du cuivre sur un substrat muni d'une grille de perçages. On trouve le cuivre aux endroits requis au moyen d'un poinçon de diamètre inférieur à celui du trou sous-jacent du substrat.



Application d'une feuille de cuivre adhésif sur un substrat prépercé. Ensuite on découpe et on enlève par pelage le cuivre inutile. (Document Rastra Electronics Ltd.).

Diverses formes et dimensions existent sur le marché, en ce qui concerne les circuits à réaliser par adhérence et pelage du cuivre. Leur difficulté d'utilisation dans le cas des transistors et des circuits intégrés vient de ce que les pastilles doivent être découpées très proches les unes des autres, et être de petites dimensions.

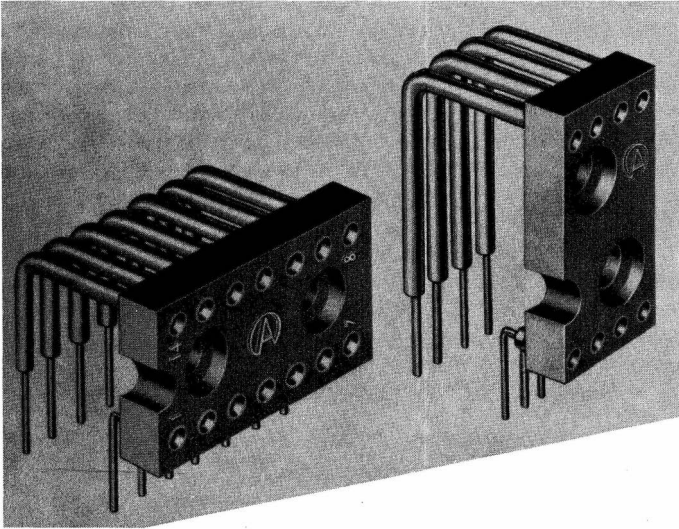
Ces méthodes doivent être considérées comme expérimentales, et à usage temporaire. La mise au propre définitive des maquettes ainsi réalisées est tout à fait recommandée après mise au point, sous forme d'un circuit imprimé gravé. La durée de vie des circuits réalisés au moyen de cuivre adhésif est tout à fait inadaptée à ce qu'on attend généralement d'un équipement électronique.



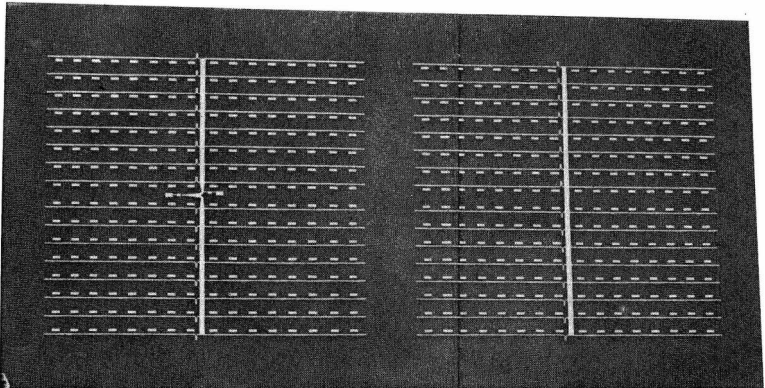
Câbles plats pour interconnexions souples ; l'un comporte 7 conducteurs (à gauche) et l'autre 14. Ces derniers peuvent être raccordés au circuit imprimé soit par soudure directe (à gauche) soit par un connecteur de carte (à droite). (Document Tekdata Ltd.).

Les câbles souples utilisant des pistes imprimées sont maintenant largement utilisés pour relier des systèmes modulaires. On réalise ainsi un gain de place, aucun repérage par couleurs n'est nécessaire, et des dispositifs d'interconnexion amovibles peuvent être réalisés entre connecteurs de cartes. On rencontre ce système de liaison dans les équipements informatiques, les machines de bureau et l'instrumentation scientifique. Ces moyens de connexion sont parfaitement adaptés aux interconnexions devant passer par une charnière (panneaux ouvrants devant fonctionner en position de maintenance, par exemple), ou devant présenter simultanément de l'élasticité et de la souplesse (imprimantes de calculateur).

Les *câbles plats*, ainsi formés peuvent facilement être protégés pour résister à des environnements sévères au moyen de couches de renfort. On rencontre ces types de câbles en télécommunications, transmission de donnée, et dans les systèmes d'alimentation électrique.



1. Les embases DIL peuvent porter des circuits intégrés comme des afficheurs lumineux. Deux exemples sont visibles ici d'embases pour montage à angle droit sur un circuit imprimé. (Document Rastra Electronics Ltd.).



2. Application inattendue des circuits imprimés ; on peut voir ici une antenne pour radar anticollision. (Document EMI-Varian Ltd.).

Là où l'on avait besoin de câbles de tenue mécanique importante, on peut se contenter de fils plus fins, puisque le support plat offre toutes les qualités requises pour la tenue en flexion de l'ensemble des pistes parallèles. Le plus commun est le mylar, ou film de polyester, qui *tient* en température jusqu'à 125° en pointe, et 80° en fonctionnement continu, sans dégradation notable. Le cuivre adhère au support par l'intermédiaire d'un adhésif retardant à la combustion. Un autre matériau est constitué par le polyimide ou (KAPTON), très fiable en température ; des adhésifs à base de Teflon sont utilisés pour coller le cuivre sur le polyimide, ce qui réduit la limite thermique de 500° à 200°C ; dans le cas des adhésifs de polyester, cette valeur tombe à 150°C en pointe, et 90°C en continu. Pratiquement, l'on se fixe une marge de sécurité, et l'on ne dépasse pas 60°C.

De simples pistes de cuivre laminées sont généralement utilisées ; on rencontre cependant des pistes argentées dans le cas de l'utilisation des Téflons et des polyimides. On peut aussi enrober des câbles cylindriques dans une limande en matériau plastique, mais la résistance à la flexion et la durée de vie en sont moins sûres.

Les caractéristiques habituelles de ces conducteurs sont les suivantes :

<i>Section (mm x mm)</i>	<i>Résistance par mètre (ohm)</i>
0,6 × 0,05	0,564
0,6 × 0,07	0,357
1,07 × 0,07	0,237
1,6 × 0,07	0,144
1,6 × 0,12	0,087
2,5 × 0,12	0,057

Le câble plat est constitué d'un certain nombre de ces conducteurs disposés parallèlement avec un pas donné. Des dérivations par connecteur *repiqués* dans le câble plat sont faciles à établir. Des pliages peuvent être thermoformés lors de la fabrication, ce qui permet de créer des cheminements anguleux au sein des équipements qui les utilisent.

TABLEAU 5. Dimension des trous pour les fils composants.

<i>Diamètre nominal des perçages</i>	<i>Diamètre des mèches</i>	<i>Jauge du fil (Standard Wire Gauge)</i>
mm	mm	S.W.G.
0.6	0.9 à 1.0	24
0.75	0.9 à 1.0	22
1.0	1.0	20
1.3	1.3	18
1.7	1.7	16
2.05	2.05	14
2.65	2.65	12
3.3	3.3	10

index

A		D	
Amplificateur à transistors	29	Décharge par effet corona	20
Antenne radar	81	Découpe du circuit imprimé	71
		— et pelage du cuivre	75
		— par perforation	71
		Défauts	45
		Développement photographique	54
		Dimension des pastilles	41
		Dorure	73
B		E	
Bac à carte	9	Ébavurage	50
Blocs fonctionnels	8	Écartement des pistes	18, 22
Brosse de nettoyage	45	Écran	39, 64
Brûlures	19, 53	Embases pour circuits imprimés	63
Buse d'alimentation	32	Étamage	52, 72
C		F	
Câbles souples	8, 80	Fer à souder	55, 65
Capacités parasites du circuit imprimé	39	Figurines transferts	37
Carte à trous pastillés	75	Fils soudés	38
Carte enfichable	7	Fil de liaison	30, 38, 59, 82
Cartes pré-perforées	39	Finition du pastillage	36, 70
Cartouchiere	59	Fissures	56
Circuit double face	12, 68	Flux	52
— pour boîtiers DIL	77		
— fibre de verre	68	G	
Circuits intégrés	12, 27, 32	Gravure	43, 48, 68
— souples	8		
Composants	28, 58		
— à queues préformées	58		
Connecteur de carte	65, 78		
— encarté	41, 72, 78		
Constante diélectrique	21		
Couplage capacitif	39		
— inductif	39		

I	
Identification des matériaux de base	17
Intensités	11, 19, 23, 40
Implantation des composants	26, 28
— des pistes	28
— de type industriel	67
Impuretés du bain de soudure	53

K	
Kits	43

L	
Largeur de piste	29, 40
Lettres-transferts	8

M	
Machine à percer	69
Masques	47, 48, 71
Masque photographique	54
Matrice de perçage	70
Matériaux laminés	15, 44
Meulage	71
Micro-fissures	20, 56

N	
Nettoyage du circuit	49, 50

O	
Outillage	55
Outils de gravure	51
Oxydation	65

P	
Papier imprégné de résine synthétique	68
Pastillage	44, 70
Pastilles de cuivre	41
— pour boîtiers DIL	77
Perçage	21, 36, 50, 70, 83
Pistes d'alimentation	30, 32
Placage	7, 73
Plan de masse	28, 64, 78
Plots	38, 61
Pochoir	67
Ponts de connexion	12
Protection des circuits	72
Pureté du cuivre	22

R	
Radiateur	42
Réparations	58
Résine epoxy	10, 15, 17
— phénolique	15
Résistance des pistes de cuivre	23
— d'isolement	18
— à la flexion	16
Résistivité	18, 23
Rinçage	51

S	
Schéma électronique	25
Sciage	71
Séchoir	44, 51, 54
Section des pistes	19
Sensibilisateur ultraviolet	68
Solution de gravure	49
Soudure à la vague	8
Soudures sèches	64
Stades de réalisation	4

T	
Techniques industrielles	66
Tensions d'amorçage	23
Transfert à sec	8, 31, 36, 47, 79
Transistors	27, 63
Trous métallisés	12

V	
Veroboard	75
Verre epoxy	79
VHF (circuits —)	20
Volume (résistivité de —)	20

Imprimerie BOUDIN
Dépot légal : 3è trimestre 1978
N° d'éditeur : 3250

