

TECHNOLOGIE et REALISATION de CIRCUITS IMPRIMES ELECTRONIQUES

1 DEFINITION D'UN CIRCUIT IMPRIME

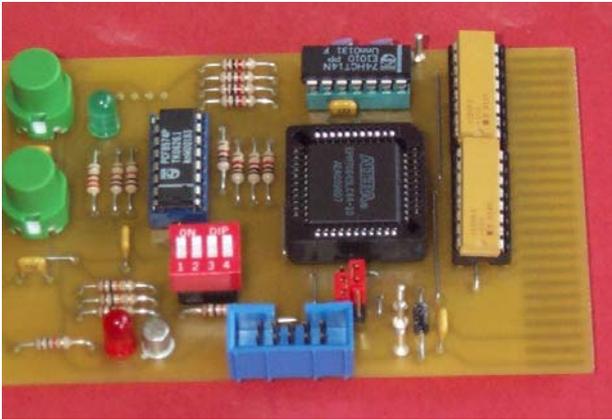


figure1 un exemple de circuit imprimés simple face)

Il s'agit d'un support (généralement semi rigide mais parfois souple) constitué d'un matériau isolant (époxy, bakélite, FR4) permettant de réaliser l'interconnexion électrique entre des composants électroniques. Ces interconnexions sont matérialisées par des pistes de cuivre déposées sur les surfaces externes de la plaque isolante (dans le cas de circuits standard double face) ou même sur les faces internes et externes du support isolant. On parle alors de circuits multicouches, sorte de millefeuille de couches conductrices et isolantes. Sur la figure 2, est présenté un exemple de circuit à 4 couches électriques. Les deux couches externes (Top elec désignant le coté composant, et bottom elec le

coté soudure opposé) servent à souder les composants de la carte. Ce sont des couches de signal. Les deux couches internes, Ground (Power plane) et Power (power plane) ne servent qu'à distribuer les alimentations aux différents circuits de la carte.

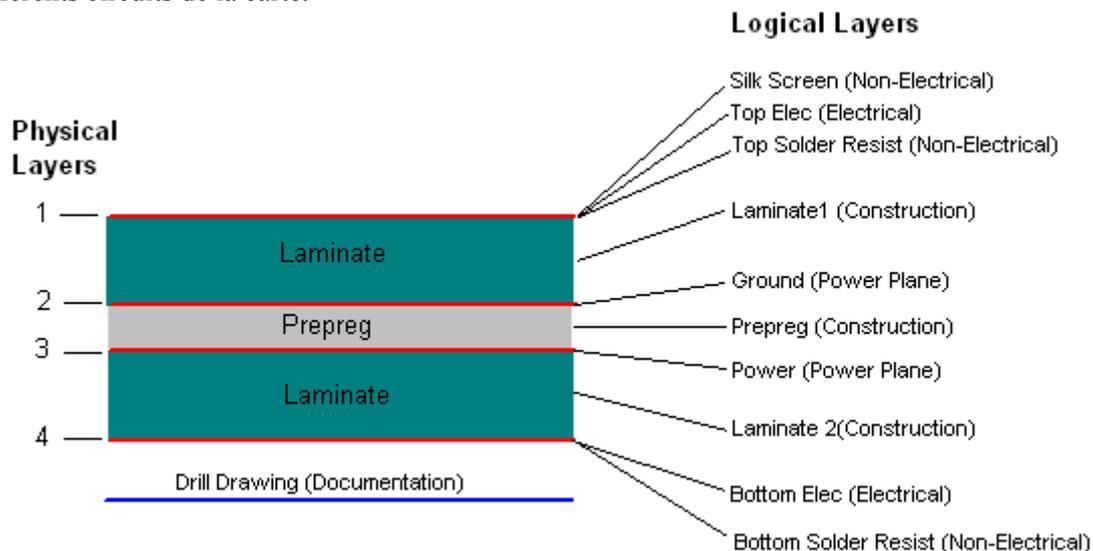


figure 2 : vue en coupe d'un circuit 4 couches

Sur cette carte figurent des couches de traitement des surfaces externes :

Silk Screen : désignant la sérigraphie, c'est à dire le nom et l'emplacement des composants sur la carte pour faciliter leur mise en place et le repérage en cas de dépannage.

Solder Resist : qui est un vernis protecteur contre l'oxydation et les attaques chimiques couvrant les pistes de cuivre sauf les pastilles servant à la soudure des composants.

Les autres couches plus épaisses sont des couches dites de construction, à savoir de l'isolant électrique.

1.1 Types de circuits imprimés standard

Classiquement, on retrouve 4 grands types standard de circuits imprimés industriels.

1.1.1 • Les circuits simple face :

Une seule face de cuivre est déposée sur un support isolant (figure 3). Ceci ne permet pas de croiser les pistes de cuivre de potentiel différent, sauf à y implanter des straps (cavalier réalisé en câble rigide enjambant, côté composant, la piste à croiser voir chap. 1.2) .



figure 3 : constitution d'un CI simple face

Ce type de circuit, peu coûteux, ne permet pas de réaliser des assemblages de composants de haute densité (à cause de la seule couche de cuivre disponible pour relier les composants entre eux) et le support isolant utilisé (généralement de la bakélite), peu résistant aux contraintes mécaniques, limite ce type de circuits à des applications grand public (électroménager, hi fi, TV ...).

1.1.2 • Les circuits double face industriels

Cette fois, le support isolant est pris entre deux couches de cuivre (côté composant en haut et côté soudure en bas voir figure 3). Cette disposition autorise les pistes de potentiel différent, à se croiser sur les faces opposées ce qui permet d'augmenter la densité de composants sur la carte ou même de disposer des composants sur les deux faces du CI.

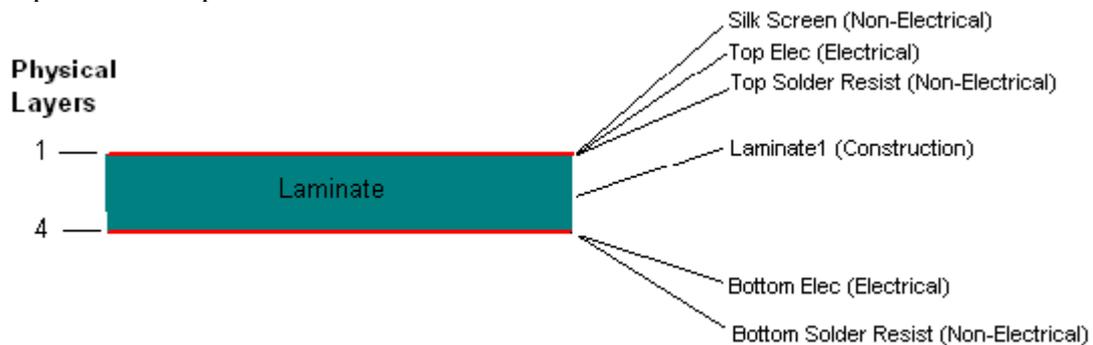


figure 4 : exemple de double face avec sérigraphie côté composant et vernis épargne sur les deux faces externes

1.1.3 Les circuits multicouches

Cette fois, on réalise un empilage de couches électriques séparées par un isolant très fin. On réalise classiquement jusqu'à 16 couches électriques (parfois 22 dans certaines applications spéciales), toutes parfaitement superposées entre elles et communiquant par des vias ou des trous métallisés. Voir Figure 5

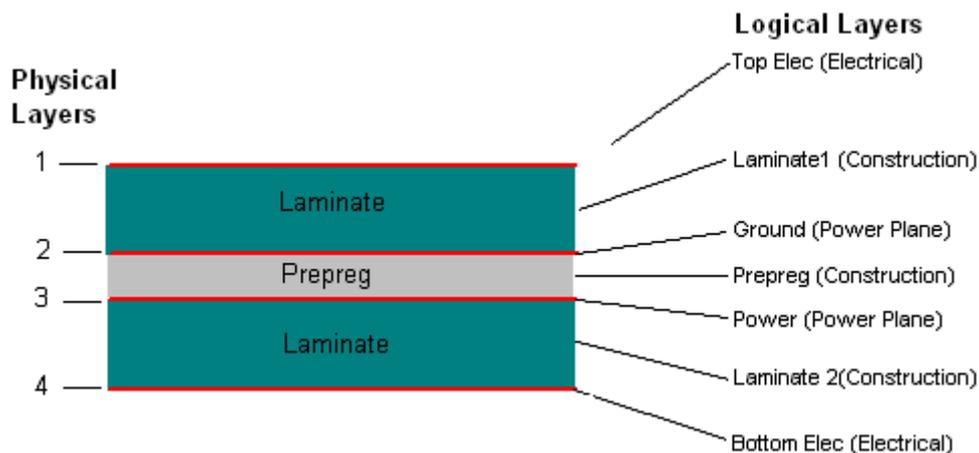


figure 5 : exemple de circuit à 4 couches ; deux couches de signal externes, et deux couches d'alimentation internes.

L'outillage (prix correspondant à la réalisation des films et le réglage des machines) nécessaire pour réaliser ce type de produit étant très coûteux, on réserve ces CI pour des applications où la densité d'implantation des

composants et la complexité du routage l'exigent, en assurant une production en grande série pour rentabiliser l'outillage
. Ci dessous, un exemple de fabrication de cartes mère de PC sur la figure 6.

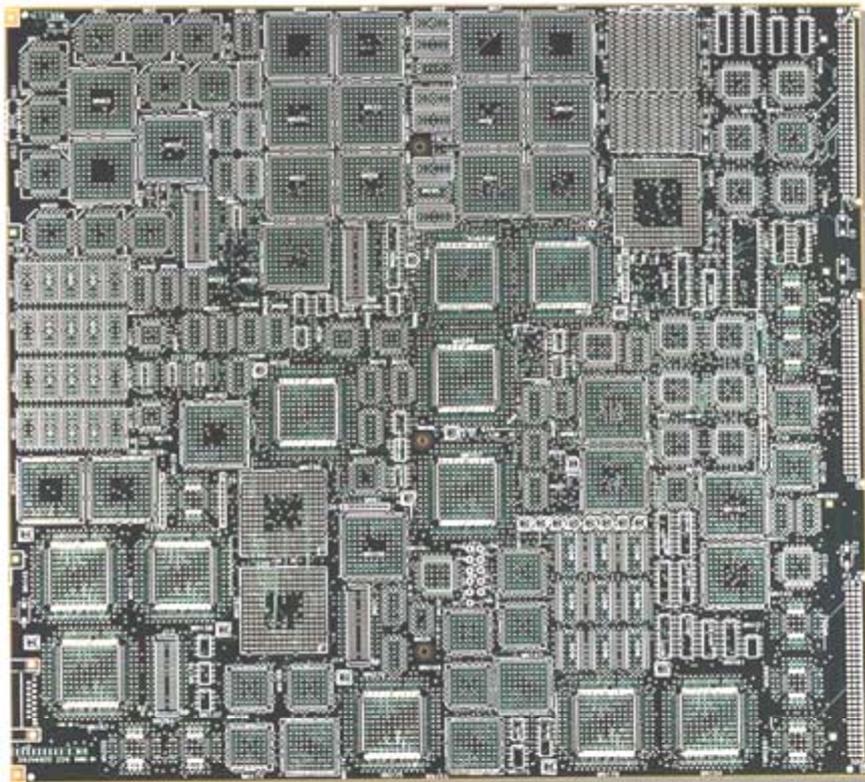
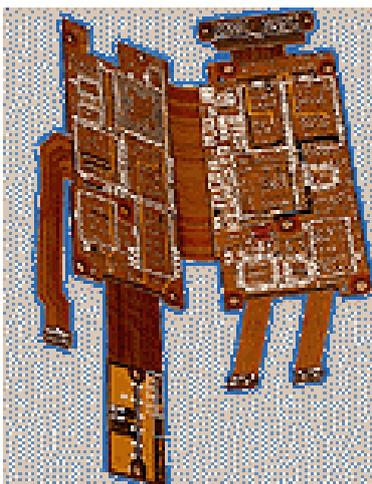


figure 6 : exemple de carte 16 couches à haute densité d'intégration

1.1.4 Les circuits imprimés souples

Pour des applications spéciales de très haute densité d'intégration (ex baladeurs, informatique portable, téléphonie sans fil...), certains fabricants proposent des supports de connexion souples pouvant s'adapter aux formes du boîtier des appareils. Parmi les avantages de ces produits novateur on remarquera :



- réduction des coûts d'environ 30%
- réduction du poids d'environ 30%
- gain d'espace d'environ 60%
- technique beaucoup plus fiable que le câblage traditionnel
- élimination d'erreurs dans le câblage
- reproductibilité électrique et mécanique
- élimination d'une partie de la connectique.

figure 7 : exemple de circuit imprimé souple intégrant la connectique externe

1.2 Les VIAS

La communication entre les deux couches électriques externes se fait au moyen de **VIAS**, sortes de rivets métalliques percés au travers du circuit imprimé et permettant de propager une équipotentielle d'une couche à l'opposé. Ces vias peuvent aussi recevoir une patte de composant et assurer en même temps une fonction mécanique.

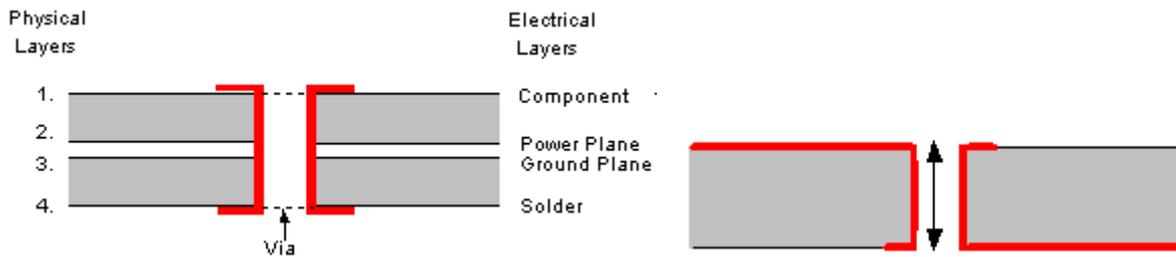


figure 8 : Mise en place d'un via au travers d'un CI pour faire communiquer la couche inférieure (solder) et la couche supérieure (component)

L'autre solution consiste à déposer chimiquement la métallisation par plaquage à l'intérieur du trou du via à l'aide d'une solution chimique. La carte est trempée dans un bain de solution et soumise à une réaction d'électrolyse pour que le dépôt métallique puisse opérer.



figure 9 : une machine de métallisation électrolytique.

1.3 Technologie des constituants d'une carte imprimée

1.3.1 Couches électriques

Les épaisseurs de cuivre standard sont du **35µm/couches**. On peut demander en option des épaisseurs plus importantes pour des applications d'électronique de puissance, à savoir **70µm/couche** ou même **100µm/couche**. Bien évidemment, le coût augmente fortement.

1.3.2 Couches isolantes

Ces couches permettent de rigidifier la carte tout en isolant les couches électriques entre elles. Généralement en époxy (standard industriel FR4) elles ont une épaisseur de **16/10 de mm** mais certaines options permettent d'aller à **20/10mm** ou même à **24/10mm** pour des applications où sont implantés des composants très lourds.

La permittivité des matériaux isolants a aussi une importance dans le cas d'applications haute fréquence. En effet, deux pistes disposées de part et d'autre d'un matériau isolant constituent une capacité qui peut influencer la forme des signaux qui circulent sur des cartes à haute vitesse de propagation (application de logique rapide en télécommunication, routeur Internet...). Ce travail de disposition des pistes et de calcul des perturbations est assuré par le logiciel de CAO.

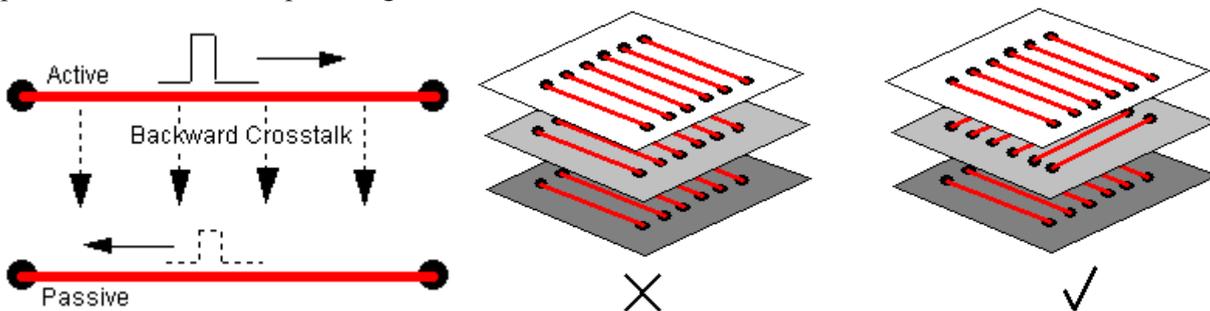


figure 10 : diaphonie entre pistes de cuivre et disposition des couches de routage

Des outils d'aide à la conception de circuits imprimés (exemple EMC adviser sous CADSTAR) renseignent le concepteur sur d'éventuels problèmes de temps de propagation des signaux ou de sensibilité de la carte à des perturbations extérieures.

Dans ces applications spéciales, le client peut demander des caractéristiques de permittivité et d'épaisseur d'isolants spéciales pour optimiser le comportement futur de la carte.

En effet, depuis janvier 1996 tous les produits importés dans la communauté européenne doivent être conformes à des normes de pollution électromagnétique pour posséder le label CE.

1.4 Traitements optionnels

En plus de la réalisation des couches électriques, il existe plusieurs traitements optionnels du circuit imprimé :

1.4.1 L'étamage

Cela consiste à déposer par plaquage chimique ou mécanique, une fine couche d'étain (10 à 15 µm) pour protéger le cuivre contre l'oxydation naturelle. Le circuit présente alors un aspect argenté. La carte passe entre deux rouleaux qui pressent une fine couche d'étain sur la surface cuivrée du circuit imprimé final.

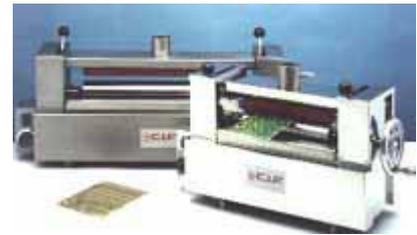


figure 11 : machine à étamer par pression entre rouleaux

1.4.2 Le vernis épargne

Une fine couche de vernis protecteur est déposée sur les couches électriques externes de la carte à l'exception (épargne) des pastilles destinées à recevoir les composants. En plus d'une fonction protectrice anti oxydante, cette couche empêche la soudure de se placer ailleurs qu'aux endroits prévus, notamment lors des procédés de soudure à la vague (la carte, avec ses composants, vient glisser sur une vague d'étain en fusion. Tous les composants sont soudés en même temps).

1.4.3 La sérigraphie

C'est un marquage du nom et de l'emplacement des composants sur la face destinée à recevoir les composants. Elle permet de faciliter l'implantation manuelle des composants et aide à la localisation des circuits en cas de dépannage ultérieur.



figure12 : ensemble de sérigraphie

2 METHODES DE FABRICATION D'UN CIRCUIT IMPRIME

Il existe trois grandes méthodes de fabrication des circuits imprimés

- * une artisanale, permettant de fabriquer quelques prototypes de circuits imprimés
- * une semi industrielle dite par fraisage : gravure anglaise
- * une industrielle où on fait appel à un sous-traitant spécialisé dans la production en grand nombre en lui fournissant des fichiers informatiques de CAO (gerber et excellon)

2.1 Méthode Artisanale

Il faut disposer en premier lieu d'un document papier (un typon) semi transparent (réalisé sur un calque de polyester) représentant le trajet des pistes de cuivre à graver sur la plaque de CI. Enfin, il faut une plaque de CI simple ou double face (entièrement cuivrée) recouverte d'une résine photosensible aux UV. On ne peut réaliser ainsi que du simple ou double face.

La méthode de gravure est globalement destructrice car on procède à chaque fois par élimination de couches.

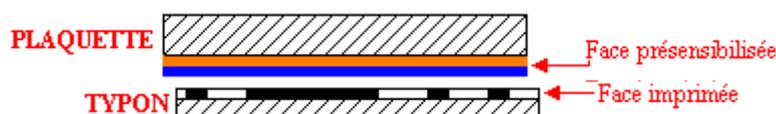


figure 13 : superposition du typon et de la plaque photo sensible pour l'insolation

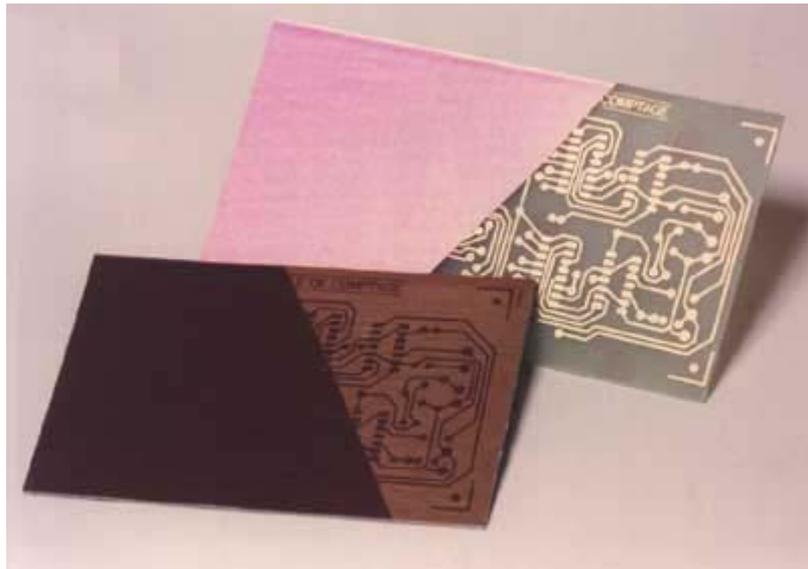


figure 14 : exemple de carte en cours d'élaboration de gravure chimique

2.1.1 Etape 1: l'insolation de la plaque.

Il s'agit d'intercaler le typon entre une source de lumière UV et la plaque de cuivre recouverte d'une couche de résine photo sensible. Partout où le typon n'est pas imprimé, la lumière UV le traverse et vient frapper la résine photosensible de la plaque de CI. Celle-ci se dégrade alors sous l'effet des UV

Le typon et le schéma d'implantation ne sont pas inversés

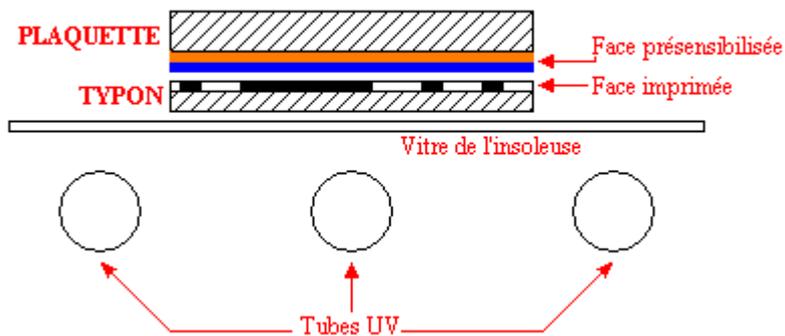


figure 15 : vue en coupe du typon et de la plaque de CI lors de l'insolation

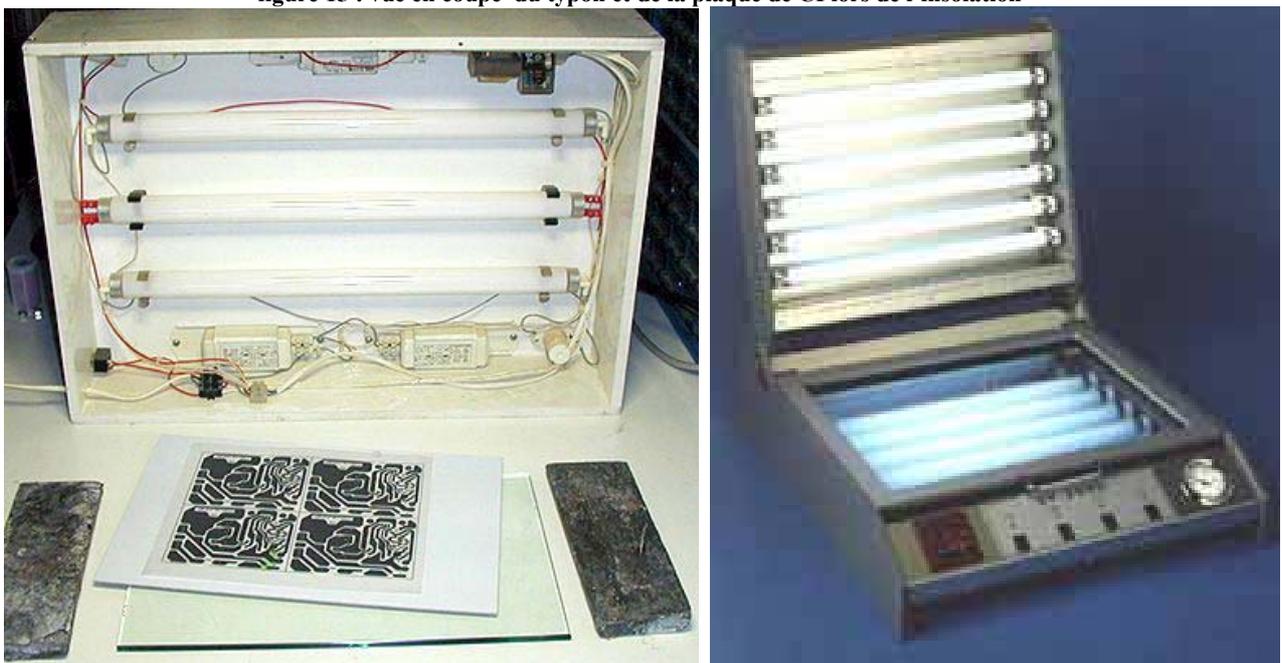


figure 16 : une insoleuse artisanale... et professionnelle (sous vide) et le typon à insoler

Cette phase ne dure que 2 à 3 minutes avec une insoleuse professionnelle. Il est important que la face imprimée du typon soit le plus plaquée contre la résine photosensible afin de limiter les effets de diffraction de la lumière (amélioration de la définition des contours des pistes). Elle est donc généralement réalisée sous vide d'air pour assurer un plaquage optimal.

2.1.2 Etape 2 : la révélation



Il s'agit d'éliminer la résine photosensible dégradée par les UV au moyen d'une solution de révélateur chimique (lessive de soude). Une fois la résine dégradée éliminée, seule la résine épargnée des UV subsiste et protège encore le cuivre contre une attaque chimique.

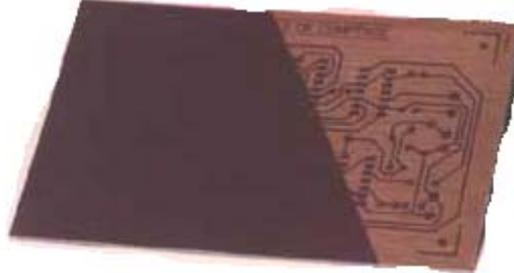


figure17 : révélateur et plaque insolée en cours de révélation

2.1.3 Etape 3 : la gravure



Il s'agit cette fois de faire agir un acide corrosif (perchlorure de fer) sur les parties de cuivre qui ne sont plus à l'abri de la résine photosensible. Le cuivre non protégé sera alors détruit sous l'effet de l'acide et laissera apparaître le support isolant du circuit imprimé. Cette opération se fait dans un bain d'acide chauffé à 50° et oxygéné par un mousser pour activer la réaction chimique avec le cuivre de la plaque.

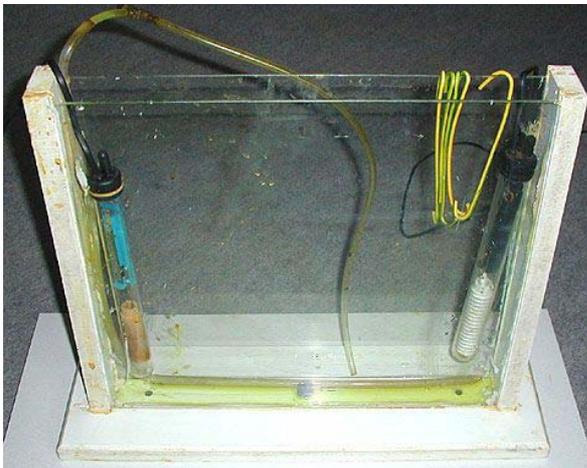


figure 18 : graveuse artisanale... avec chauffage et mousser

2.1.4 Etape 4 : le nettoyage :

Après gravure, la plaque doit être nettoyée abondamment à l'eau chaude sous pression pour éliminer les restes d'acides qui pourraient subsister par capillarité dans les coins des pistes (on route souvent avec des angles à 45° pour éviter ces phénomènes).

Il faut ensuite éliminer le reste de résine photosensible recouvrant les pistes qui ont résisté à l'acide avec de l'alcool.

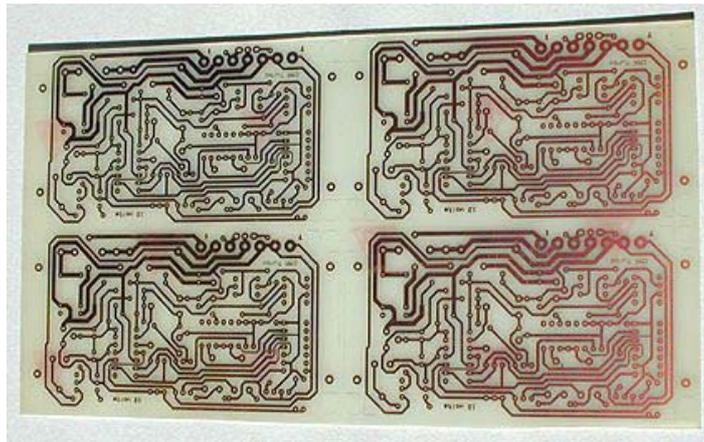


figure 19 : résultat après gravure et nettoyage de la plaque de circuit imprimé
Le cuivre est à l'état brut et doit être protégé rapidement.

2.1.5 Etape 5 : traitements optionnels de protection



Vernissage

On doit recouvrir la plaque ainsi gravée, rapidement avec un vernis thermo-soudable qui aura un rôle anti-oxydant et décapant lors de la soudure des composants.

Sérigraphie



Il est possible aussi de réaliser un marquage de sérigraphie pour indiquer la position des composants à implanter. Ce procédé sérigraphique est le même que celui utilisé pour la reproduction d'œuvres d'art. Un cadre toile recouvert de cire photosensible est insolé avec un typon contenant le marquage selon le même procédé que la plaque de CI

2.2 Méthode semi industrielle dite par gravure anglaise

Cette fois , le poste de CAO, qui a permis de dessiner la carte, est connecté à une fraiseuse de haute précision (25um) qui détoure (élimination du cuivre en surface par abrasion) une plaque de circuit imprimé vierge afin d'isoler des zones de cuivre entre elles :

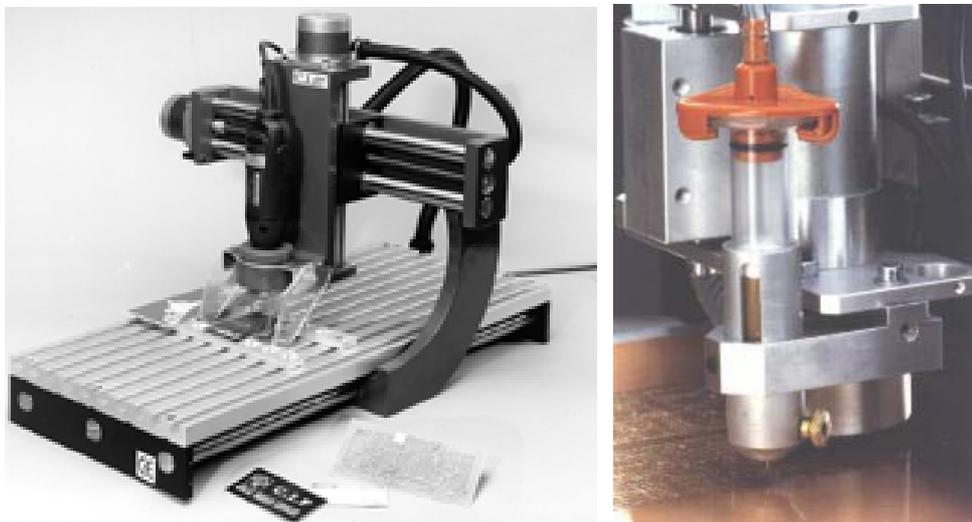


figure 20 : fraiseuse 3D de précision (25um)

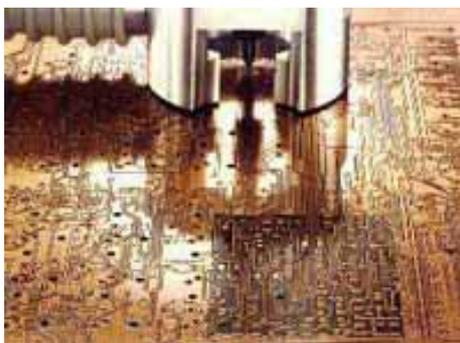


figure 21 : vue d'une fraiseuse 3D, zoom de la tête de fraisage

Cette méthode permet d'obtenir de petites séries de cartes (moins de 10 unités) sans utiliser de produits chimiques avec un résultat relativement précis. Malheureusement le prix de la fraiseuse 3D et du logiciel de pilotage (15.000€) et le coût de remplacement des fraises limitent l'utilisation de cette méthode.

3 LA SOUDURE DES COMPOSANTS SUR LA CARTE

3.1 Soudure manuelle

Elle est généralement réalisée à l'aide d'un mélange d'étain (60%) et de plomb mais parfois, on rajoute de l'argent pour améliorer la qualité des contacts.

Pour souder les composants traversant la carte (ancienne génération de composants), on utilise un fer à souder électrique (350° environ) que l'on pose au contact de la pastille à souder et de la patte du composant pendant 3 secondes maximum.

Les deux parties étant chaudes, on amène enfin de la soudure (possédant une âme décapante à l'intérieur) et celle-ci doit s'étaler sur les deux pièces à souder sous l'effet de la capillarité.



figure 22: vue en coupe de la soudure d'un composant traversant.

3.2 Soudure à la vague automatique

Pour souder à grande vitesse une grande quantité de composants traversants, on peut faire glisser la carte et ses composants sur une vague d'étain en fusion.

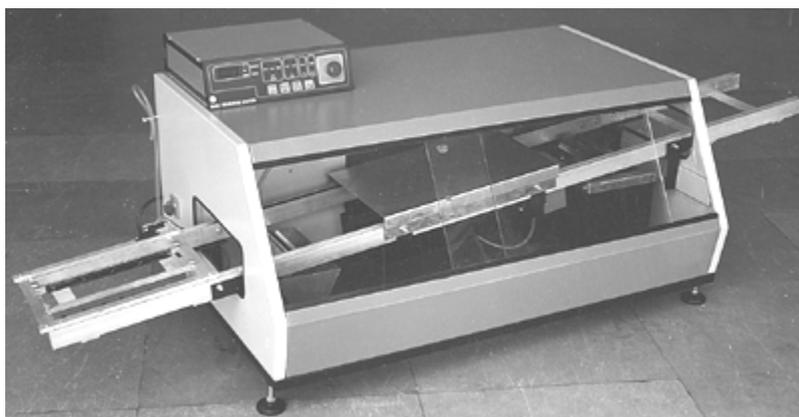


figure 23 : soudeuse à vague (détail du chariot qui va glisser sur la vague d'étain)

Pour les composants plus modernes et montés en surface de carte uniquement (composants dits CMS), leur taille réduite interdit un soudage manuel au fer. On dispose alors de la colle thermo conductrice sur la carte à souder, les composants sont disposés en surface et l'ensemble passe dans un four de refusion pour que la colle fonde et assure le contact électrique.

Ce processus est réservé à la grande série car il nécessite un outillage coûteux.

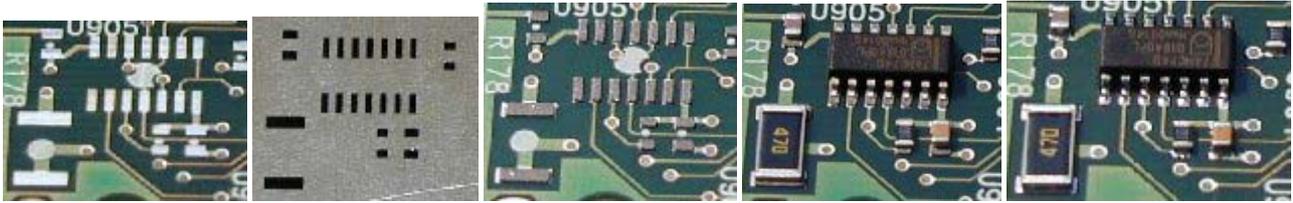


figure 24 : processus de soudage d'un cms :

ci nu,

pochoir pour la colle,

ci encollé,

pose des cms,

après refusion



figure 25: pose des CMS,



four de re-fusion de la colle CMS

3.3 Unités de mesure employée dans la CAO circuit imprimé

Historiquement, les composants étaient donc traversants et fabriqués par des sociétés anglosaxonnes ou japonaises. L'unité de mesure de base était donc le **pouce** (inch) soit **25,4mm**.

Cette unité étant trop imprécise en électronique, on utilisa des subdivisions du pouce, à savoir le **1/1000 de pouce** (le mils) soit **25,4µm** lors des phases de placement des composants et du dessin des pistes de cuivre.

On utilise aussi le pas (**1/10 de pouce**) soit **2,54mm** qui est généralement la distance qui sépare deux pattes d'un circuit intégré. On dispose de feuille de calque quadrillée au pas pour repérer les dimensions d'un boîtier de composant.

4 ORGANISATION D'UN LOGICIEL DE CAO PROFESSIONNEL. CADSTAR

Le département GEII de Nice s'est équipé de 13 licences d'utilisation d'un logiciel de CAO professionnel (CADSTAR), bien implanté dans les PME locales. Ce logiciel permet de réaliser les opérations de saisie de schéma, placement des composants et routage des cartes (**prix : 1.000€ par poste**).

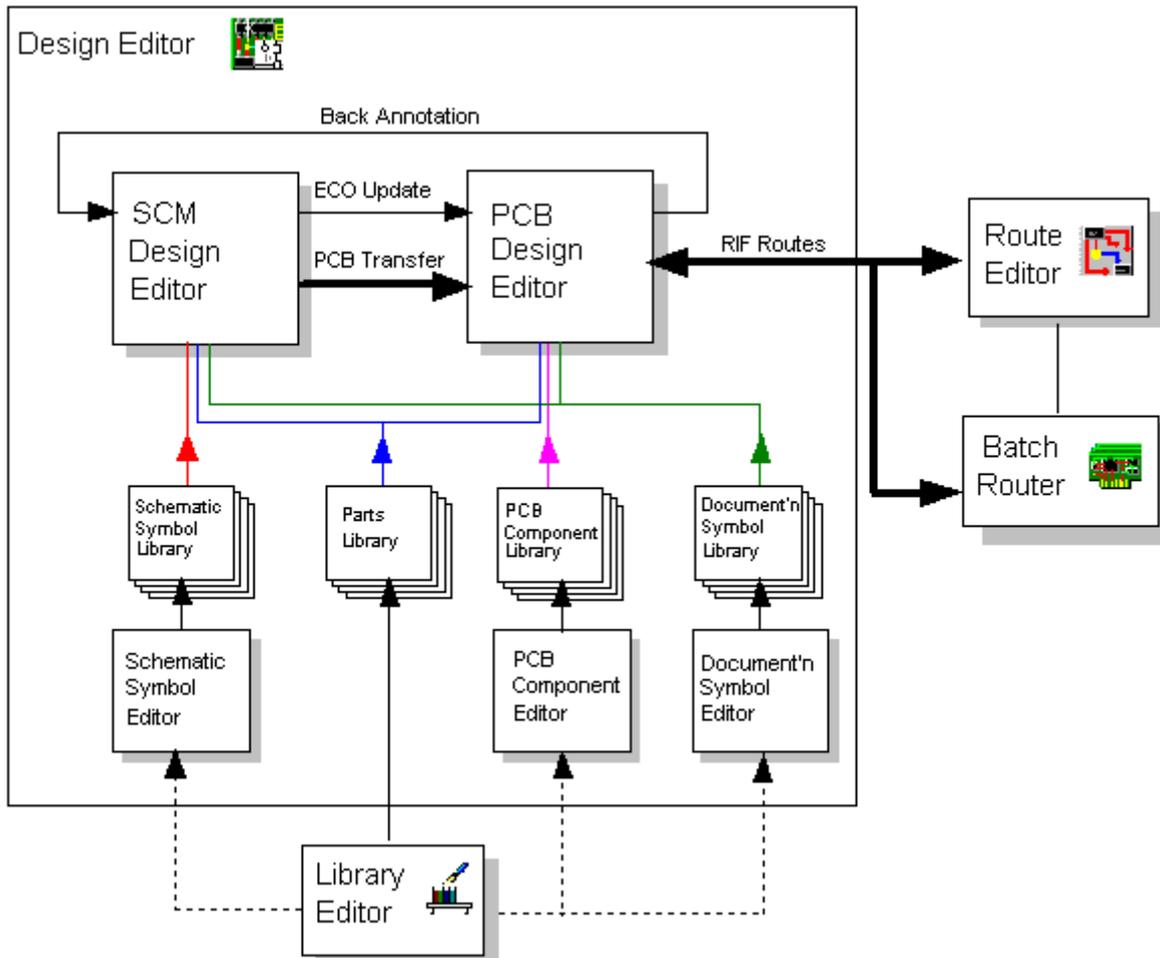


figure 26 : organisation générale d'un logiciel de CAO professionnel pour la conception de circuits imprimés

4.1 Séquence des opérations de conception

4.1.1 Etape 1: la saisie du schéma électrique

Cette étape consiste, à partir du schéma papier de la carte, à traduire ce schéma sous forme d'un assemblage de symboles de fonctions électroniques. Les symboles sont purement virtuels et ne correspondent pas à la forme physique du composant qu'ils représentent. De même, on relie ces symboles par des connexions équipotentielles (des net). Lors de cette phase, l'opérateur peut rajouter des contraintes comme la largeur des pistes à utiliser lors du routage, ou des spécifications de vitesse de propagation pour les connexions rapides.

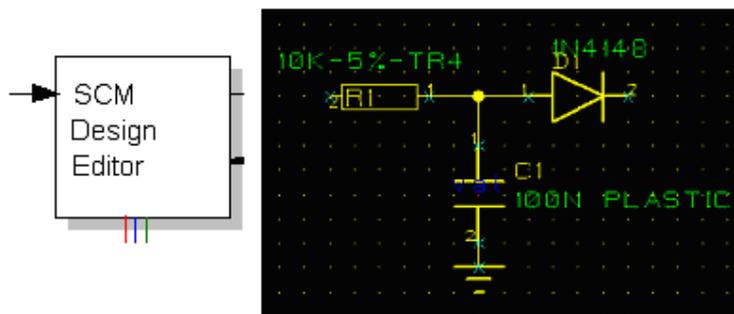


figure27 : phase de saisie de schéma

Le fichier issu de cette phase de travail sera un fichier *SCHEMATIC* possédant l'extension *.SCM*

4.1.2 Etape 2: le placement des composants dans le PCB

Le PCB désigne la carte de circuit imprimé physique. Sur cette carte figureront les composants réels avec leur dimension et leur forme définitive. On passe du *Schématic* au *PCB* par la phase de transfert vers le PCB. Le logiciel fait correspondre chaque symbole du schématique avec son boîtier physique. De même, chaque connexion du schématique sera matérialisée par une connexion dans le PCB.

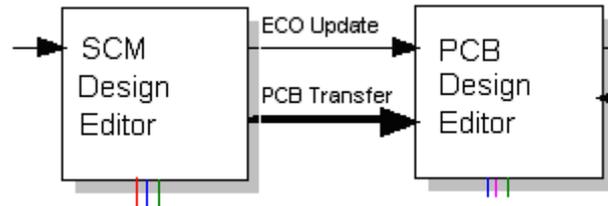


figure 28 : transfert vers le PCB et placement des composants

4.1.3 Etape 3 : le routage des pistes

Il s'agit cette fois de remplacer les connexions équipotentielles du PCB par de véritables pistes de cuivre de largeur donnée et qui ne devront pas se croiser sur une même couche électrique. Ce travail est le plus complexe car même si les outils de CAO actuels disposent de routeurs automatiques, l'expérience prouve que pour certains routages complexes, l'homme est encore obligé d'intervenir.

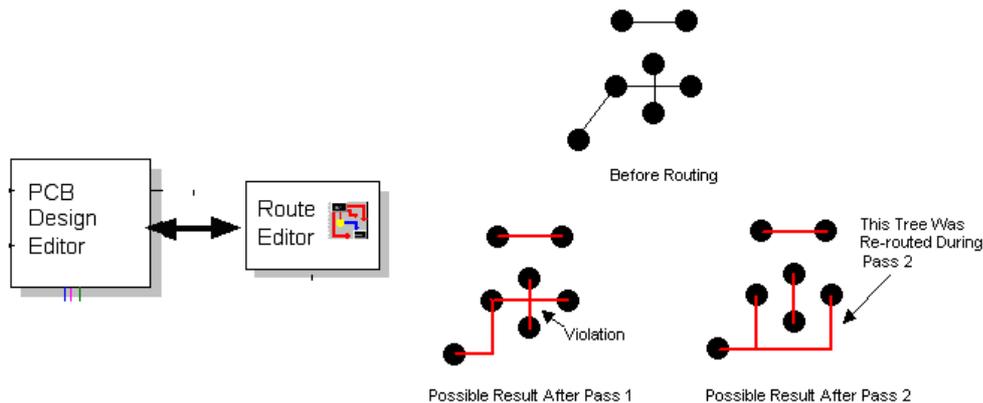


figure 29 : le routage des pistes de cuivre sur la plaque

4.1.4 Etape 4 : documents de sortie de processus

Une fois la carte placée et routée, on peut récupérer les documents qui permettront de réaliser la carte. Suivant le procédé de fabrication employé, on pourra :

- * imprimer des typons sur des calques (méthode artisanale). Cette méthode nécessite peu de matériel mais ne permet pas de réaliser des circuits de grande précision et en grand nombre. Elle restera réservée au prototype.

- * sortir des fichiers informatiques représentant les trajets des pistes (fichiers gerber) ou des trous à percer (fichier excellon). Ces fichiers seront envoyés à un sous-traitant spécialisé qui réalisera des films de chacune des couches du circuit imprimé à l'aide d'un photo traceur extrêmement précis. Les circuits seront percés automatiquement. Cette méthode industrielle autorise une fabrication de haute qualité et en grande série. Il faut cependant accepter de payer une somme importante pour l'outillage des films(150 €/films).

4.2 Organisation des bibliothèques de composants

CADSTAR possède trois grands types de bibliothèque de composants ainsi qu'un éditeur permettant de rajouter de nouvelles références :

- Une bibliothèque (library) de symboles électriques visibles uniquement en phase schématic : la *Schematic Symbol Library*.

- Une bibliothèque (library) de boîtier de composants visibles uniquement en phase PCB : la *PCB Component Library*.

- Une bibliothèque permettant de relier et de gérer les correspondances entre un symbole et un boîtier pour former un composant réel référencé par un constructeur : la *Part library*.
En effet, un même symbole (de résistance par exemple) peut correspondre à plusieurs tailles de boîtier et inversement un même boîtier peut correspondre à différents symboles. Un PART est une association UNIQUE symbole/boîtier et constitue un composant.

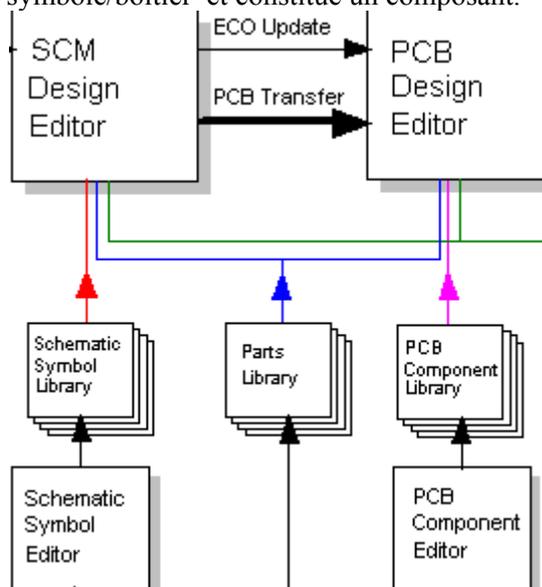
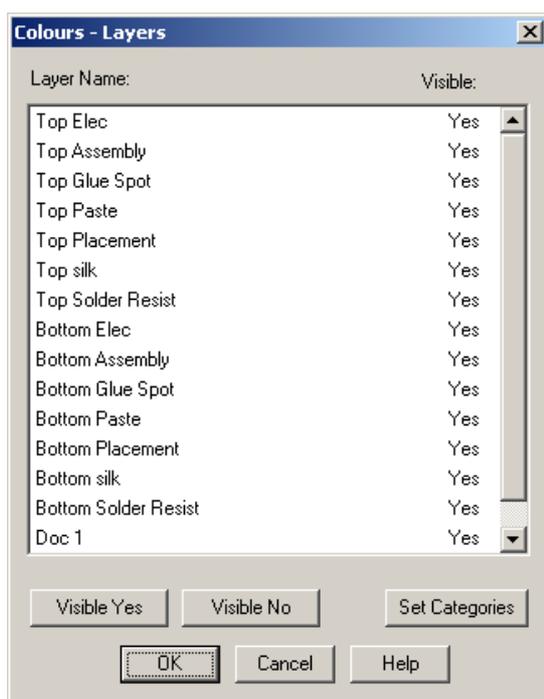


figure 30 : organisation des bibliothèques de symboles/boîtier/composants

Grâce aux éditeurs fournis par CADSTAR, il est possible de rajouter à tout moment un nouveau symbole, un nouveau boîtier ou une nouvelle association symbole/boîtier.

4.3 Couches de visibilité



Cadstar est un logiciel **WYSIWYG** (what you see is what you get), c'est-à-dire qu'il représente en temps réel la superposition des différents éléments du schéma. Ainsi, quand l'utilisateur pose un symbole sur une feuille de schéma, il pose en fait une succession d'informations superposées graphiquement les unes sur les autres sous forme d'un empilage de couches de visualisation.

De même, le PCB est une superposition de couches que l'on peut rendre sélectivement visibles ou invisibles pour n'imprimer que ce que l'on désire voir figurer in fine.

figure 31 : superposition des couches dans CADSTAR

4.4 Documents normalisés et dossiers de fabrication

4.4.1 dossier d'étude

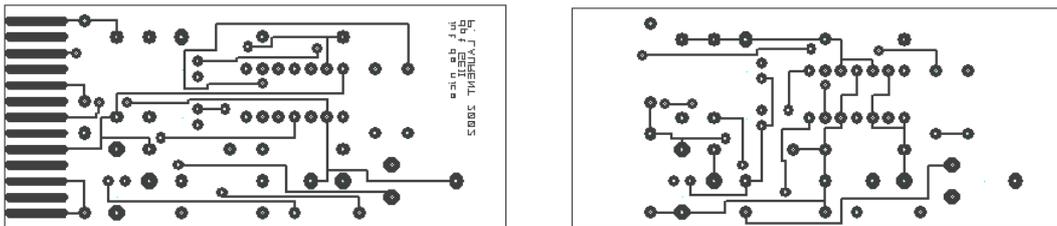
Ce document appartient au bureau d'étude et développement qui a réalisé l'étude et le dimensionnement des composants sur le schéma électrique. Il est confidentiel et ne doit pas sortir de la société qui a fait la conception du produit. Il contient l'ensemble des calculs, des sources des programmes informatiques...

Il permet non seulement de reproduire le produit mais aussi de le faire évoluer et donc rendrait inefficace un brevet en cas de fuites industrielles.

- Il contient :
- L'analyse du cahier des charges
 - Les spécifications techniques du produit
 - Un découpage fonctionnel en grands blocs
 - Une étude détaillée de chacun de ces blocs
 - Le choix des composants
 - Les programmes informatiques nécessaires au fonctionnement et aux tests du produit
 - Les procédures de tests et de calibration

4.4.2 Le dossier de fabrication

Il est destiné aux sous-traitants spécialisés du bureau de développement et notamment à la fabrication du circuit imprimé. Il permet de reproduire le produit à l'identique mais pas de le faire évoluer. Il contient notamment les fichiers GERBER et EXCELLON de la CAO circuit imprimé(dans le cas d'un process industriel) ou les typons de le carte coté soudure et coté composants, ainsi que le schéma d'implantation et la liste des composants



figures 32a et 32b : typons côté soudure et côté composants (imprimés à l'échelle 1)

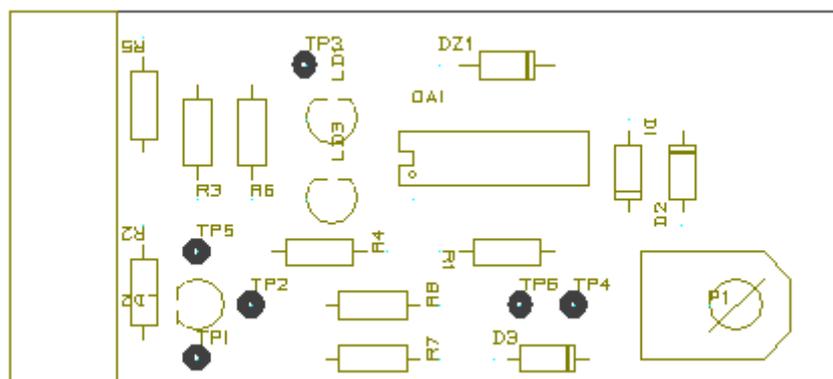


figure 33 : schéma d'implantation des composants (échelle libre)

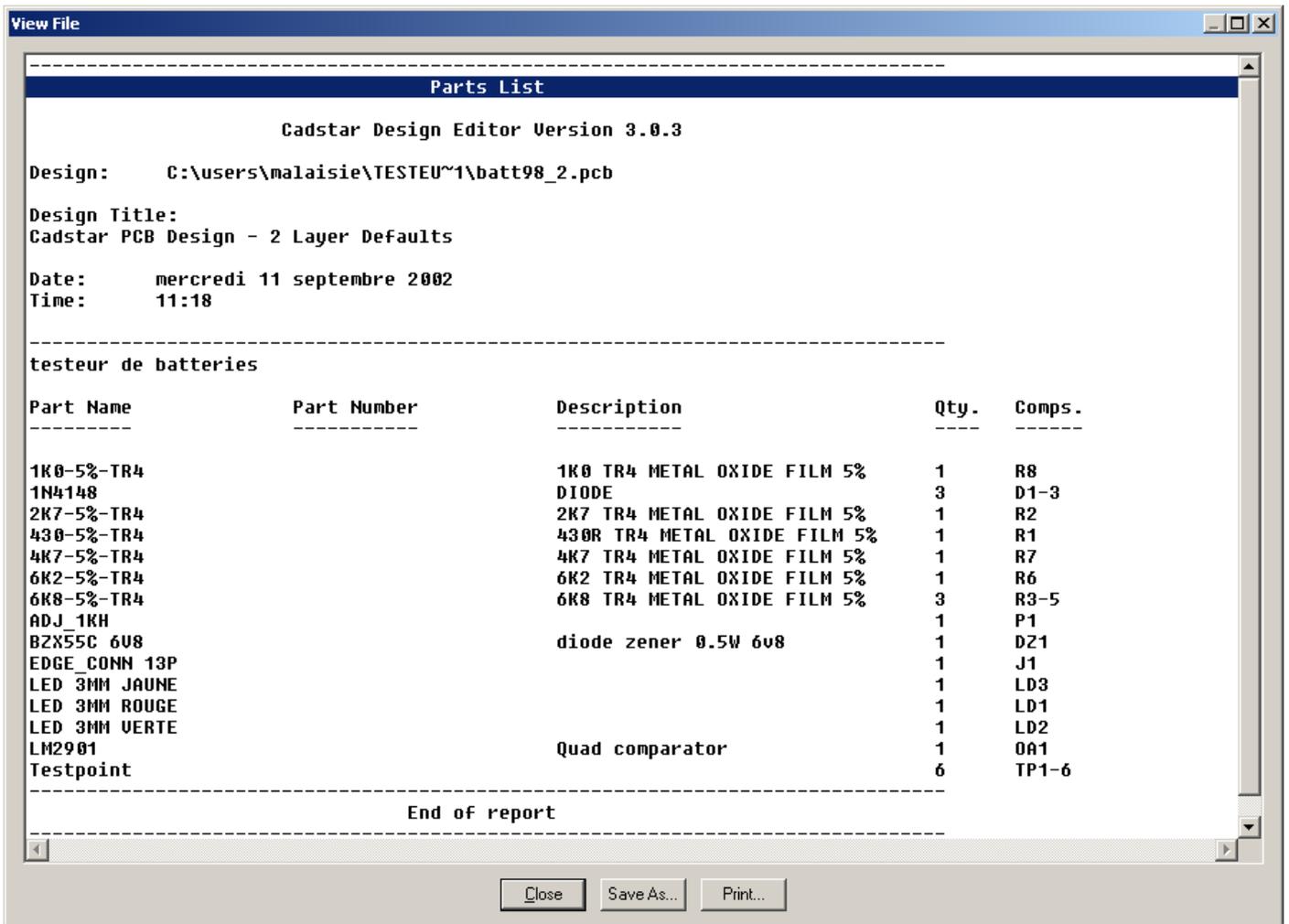


figure 34 : exemple de liste des composants

Souvent, ce sont des sous-traitants différents qui sont chargés de réaliser la carte d'une part et d'assembler les composants d'autre part dans un souci de confidentialité industrielle.

Il contient aussi les procédures de tests et de calibration du produit fini en bout de chaîne de fabrication.