Office de la Formation Professionnelle et de la Promotion du Travail

Technicien Spécialisé

# Génie électrique

## Électronique, Automatisme et Robotique

# Manuel de cours

## Module 16

## Montage des systèmes électroniques sur un circuit imprimé

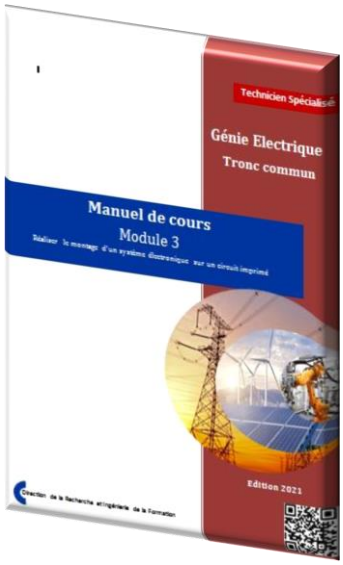
Edition 2021

Direction de la Recherche et Ingénierie de la Formation

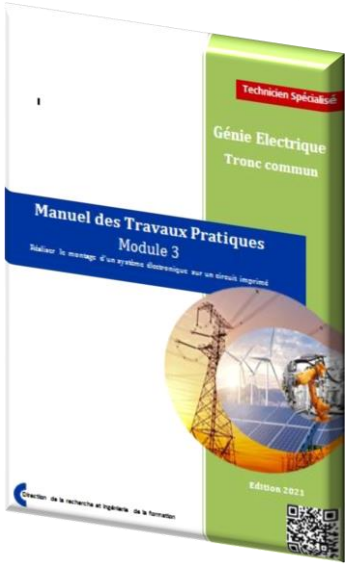
# Avant-propos

Les manuels de cours, de travaux pratiques et le guide e-learning sont téléchargeables à partir de la plateforme e-learning moyennant les codes QR suivants :

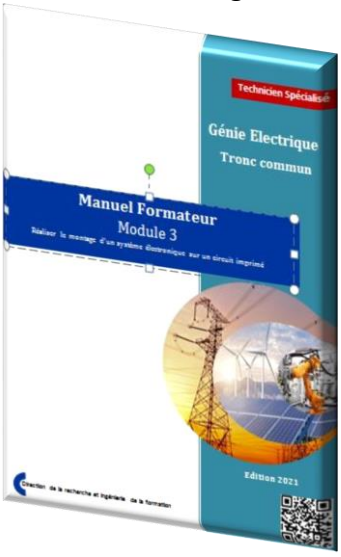
Manuel de cours




Manuel des travaux pratiques




Guide e-learning



# SOMMAIRE


**AVANT-PROPOS** ..... **2**
**SOMMAIRE** ..... **3**
**COMPETENCES-CIBLES ET OBJECTIFS OPERATIONNELS** ..... **5**
**CHAPITRE I** ..... **8**
**LA CONCEPTION DES CARTES ÉLECTRONIQUES** ..... **8**
**1 INTRODUCTION SUR LA CONCEPTION DES CARTES ÉLECTRONIQUES** ..... **9**
**1.1 Introduction** ..... **9**
**1.2 Concepts de bases d'un circuit imprimé** ..... **10**
**1.3 Topologies de routage** ..... **12**
**1.4 Les différentes couches « Layers » du PCB** ..... **13**
**2 PLACEMENT DES COMPOSANTS DANS UN PCB** ..... **21**
**2.1 Introduction** ..... **21**
**2.2 Règles de placement des composants dans un PCB** ..... **21**
**2.3 Le découplage VCC/GND dans PCB** ..... **25**
**2.4 Le Plan d'alimentation dans un PCB** ..... **27**
**2.5 Le routage d'un PCB** ..... **30**
**2.6 Implémentation des composants dans un PCB** ..... **33**
**CHAPITRE II** ..... **35**
**SOFTWAIRE POUR LE DEVELOPPEMENT DE CIRCUIT IMPRIMÉ** ..... **35**
**1 INTRODUCTION SUR LES LOGICIELS DE CAO ÉLECTRONIQUE** ..... **36**
**1.1 Présentation** ..... **36**
**1.2 Avantage** ..... **37**
**1.3 La Schématique** ..... **39**
**1.4 Conceptions multi-feuilles et connectivité** ..... **47**
**2 LE PCB** ..... **48**
**2.1 Footprint Libraries** ..... **48**
**2.2 Templates et données techniques** ..... **49**
**2.3 Routage manuel** ..... **50**
**2.4 Length Matching** ..... **51**
**2.5 Plan de masse** ..... **52**
**2.6 Stitching and Shielding** ..... **53**
**2.7 Teardrops** ..... **54**
**2.8 Verification** ..... Erreur ! Signet non défini.
**2.9 Visualisation 3D** ..... **56**

**2.10 Output Formats ..... 57**

**CHAPITRE III ..... 59**
**REALISATION D'UN CIRCUIT IMPRIME PAR LA TECHNIQUE CHIMIQUE ..... 59**
**1 GRAVURE DES CIRCUIT IMPRIMÉ ..... 60**
**1.1 Introduction ..... 60**
**1.2 Gravure chimique d'un circuit imprimé ..... 61**
**1.3 Perçage du PCB ..... 68**
**1.4 Soudage des composants ..... 69**
**WEBOGRAPHIE ..... 73**

# COMPETENCES-CIBLES ET OBJECTIFS OPERATIONNELS

**Module 16 : Montage des systèmes électroniques sur un circuit imprimé**

**Code : GEEAR-16** **Durée : 45 heures**

## ÉNONCÉ DE LA COMPETENCE

**Réaliser le montage d'un système électronique sur un circuit imprimé**

## CONTEXTE DE REALISATION

- Individuellement

- À partir de :
  - Directives ;
  - Manuels et Fiches techniques ;
  - Schémas ;
  - Représentations graphiques.
  - Normes et standards
  - Procédures de sécurité

- À l'aide de :
  - Ordinateur PC,
  - Logiciel de C.A.O.
  - Imprimante jet d´encre ou laser
  - Composantes électroniques ;
  - Matériaux d'assemblage ;
  - Insoleuse à U.V.
  - Kit de perçage-soudage pour circuit imprimé.
  - Matériel de soudage et dessoudage
  - Appareils de mesure (multimètre, isolement …)

## CRITÈRES GÉNÉRAUX DE PERFORMANCE

- Pertinence de la terminologie utilisée.
- Utilisation appropriée de l'outillage et de l'équipement
- Montage soigné et propre.
- Utilisation correcte des instruments de mesures.
- Respect des tolérances
- Respect des règles de santé et de sécurité au travail.

| ÉLEMENTS DE LA COMPETENCE | CRITÈRES PARTICULIERS DE PERFORMANCE |
|---|---|
| A. Interpréter le cahier des charges de réalisation du circuit imprimé (PCB) | • Interprétation judicieuse des éléments du cahier des charges et des directives<br>• Interprétation juste de l'information technique sur le concept de base des circuits imprimés (PCB - printed circuit board)<br>• Identification correcte des différents types de circuits imprimés (PCB)<br>• Définition correcte de la topologie du routage du circuit électronique<br>• Description minutieuse des règles relatives aux dimensions et aux emplacements des composants<br>• Description correcte des règles de découplage VCC/GND |
| B. Réaliser le routage d'un circuit imprimé à l'aide d'un logiciel CAO | • Création juste de schémas électroniques à l'aide d'un logiciel CAO<br>• Choix juste des différents éléments et des composants.<br>• Schématisation correcte d'un circuit électronique selon un cahier des charges fonctionnel.<br>• Affectation juste des propriétés et des attributs<br>• Ajustement correct du placement des composants<br>• Routage judicieux des pistes d'alimentation, de signaux et de masse<br>• Application correcte des techniques de réalisation d'un routage optimal<br>• Réalisation correcte du typon |
| C. Monter un système électronique sur circuit imprimé (PCB) | • Application correcte des techniques d'impression du typon<br>• Choix approprié du procédé de réalisation des PCB.<br>• Sélection minutieuse des matériaux de réalisation des PCB.<br>• Application correcte des techniques de réalisation du circuit imprimé (PCB) par procédé chimique<br>• Respect des procédures de placement et de soudage des composants |
| D. Vérifier le bon fonctionnement du circuit imprimé | • Conformité des tests de fonctionnement du PCB<br>• Diagnostic correct des défaillances |

| ÉLEMENTS DE LA COMPETENCE | CRITÈRES PARTICULIERS DE PERFORMANCE |
|---|---|
| | • Recherches minutieuses des causes de dysfonctionnement sur banc et schémas<br>• Utilisation correcte des appareils de contrôle<br>• Respect des règles de santé et de sécurité<br>• Rangement et nettoyage approprié de l'aire de travail.<br>• Rédaction correcte du rapport d'installation ou de la fiche d'intervention. |

# Chapitre I

# LA CONCEPTION DES CARTES ÉLECTRONIQUES

# 1 Introduction sur la conception des cartes électroniques

## 1.1 Introduction

Les Bread-boards et les perf-boards sont d'excellents supports pour le prototypage de circuits électroniques. Dans le matériel de prototypage, le processus de conception peut évoluer d'une Bread-boards (Figure. 1) à une carte perf-boards (Figure. 2) puis à une carte de circuit imprimé (PCB) (Figure. 3). La principale raison de commencer avec une Bread-boards est de planifier un concept fonctionnel. Les Bread-boards sont faciles à utiliser et peuvent accélérer les tests d'une conception. Ensuite, une implémentation de perf-board fournit un circuit plus rigide et réactif. Enfin, la conception de la carte perforée est transformée en une solution PCB pour affiner et optimiser le circuit. L'objectif d'un PCB est de créer un dispositif fiable, déterministe et bien emballé entre le concepteur et le fabricant. Ce dessin doit d'être rigoureux.

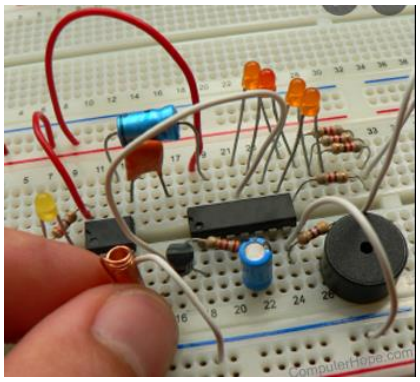


Figure 1 : Bread-boards

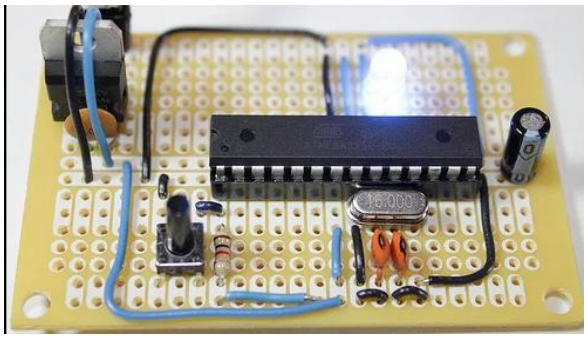


Figure 2 : perf-boards

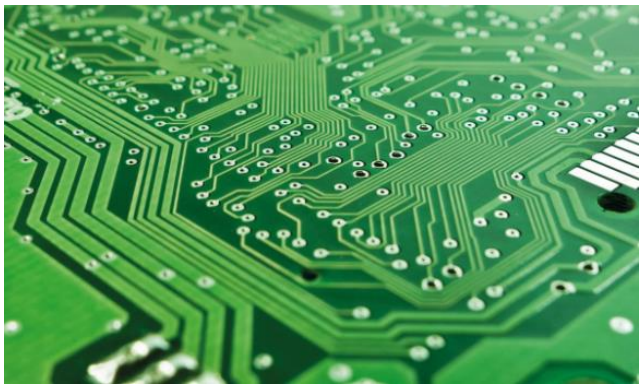


Figure 3 : PCB

Les PCB sont des circuits électriques qui sont gravés sur des stratifiés assortis via un matériau conducteur, tel que le cuivre. Le cuivre se ramifie à travers différentes couches de diélectrique isolant pour former des réseaux interconnectés.

Un PCB peut facilement devenir encombré. L'optimisation du placement et du routage globaux des composants est essentielle pour interconnecter le matériel et garantir la fonctionnalité des composants. Dans certaines conceptions, plusieurs couches sont nécessaires pour contrôler les plans d'alimentation ou de signal. Pourtant, l'ajout de plusieurs couches et la création de vias supplémentaires entraîneront le coût global de la carte, ainsi que de nombreux autres facteurs, tels que le nombre de trous percés, les différents changements d'outils pour percer ces trous, la taille de la carte, l'épaisseur du matériau en cuivre, type de matériau isolant et tolérances de trace.

## 1.2 Concepts de bases d'un circuit imprimé

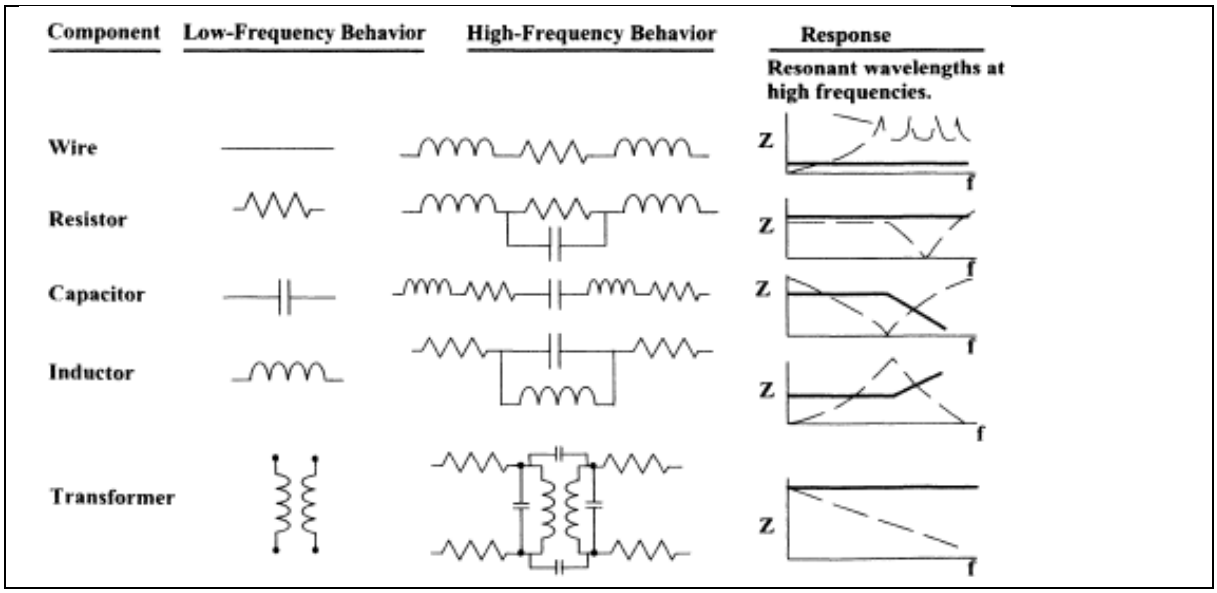
Pour assurer le développement d'un circuit imprimé qui passe avec succès les tests CEM (Compatibilité électro- magnétique) requis par les normes n'est pas aussi difficile qu'on pourrait s'y attendre. Les concepteurs s'efforcent souvent de concevoir des produits élégants. Cependant, l'élégance doit parfois être redéfinie pour inclure la sécurité des produits, la fabrication, le coût et, bien sûr, la conformité réglementaire. De tels problèmes abstraits peuvent être difficiles, en particulier si les développeurs ne sont pas familiers avec les procédures de conception ou de fabrication en dehors de leur domaine d'ingénierie spécialisé.

Ce chapitre examine uniquement les aspects liés à la CEM d'un PCB et les domaines de préoccupation au cours du cycle de conception.

### 1.2.1 Caractéristiques RF des composants passifs

Il existe de nombreuses variables qui causent des problèmes d'électromagnétique qui est liée souvent là des résultats d'exceptions aux règles normales de comportement des composants

passifs. Une résistance à haute fréquence agit comme une combinaison en série d'inductance dans les conducteurs de la résistance, en parallèle avec un condensateur aux deux bornes. Un condensateur à haute fréquence agit comme une inductance avec une résistance dans une combinaison en série de chaque côté des plaques du condensateur. Une inductance à haute fréquence fonctionne comme une inductance avec un condensateur aux deux bornes, ainsi qu'une certaine résistance dans les conducteurs. Le comportement attendu des composants passifs discrets pour les hautes et basses fréquences est pratiquement différents de celle théorique comme le montre la figure suivante :




Par exemple, lors de la conception avec des composants passifs, Le condensateur ne fonctionne pas comme un condensateur parfait car il a changé ses caractéristiques fonctionnelles (opérationnelles), lorsqu'il est vu dans le domaine fréquentiel. Le condensateur agira comme une inductance, en raison de l'inductance de plomb à des fréquences supérieures à l'auto-résonance. On ne peut pas sélectionner un condensateur utilisant des caractéristiques basse fréquence et s'attendre à ce qu'il soit un composant parfait lorsque l'énergie RF, qui est un composant haute fréquence, est imprimée aux bornes.

Inversement Une inductance change son amplitude d'impédance en raison de la capacité parasite à haute fréquence, qui se produit entre les deux conducteurs et chaque enroulement individuel.

Pour être un concepteur à succès, il faut reconnaître les limites du comportement des composants passifs. L'utilisation de techniques de conception appropriées pour tenir compte de ces caractéristiques cachées devient obligatoire.

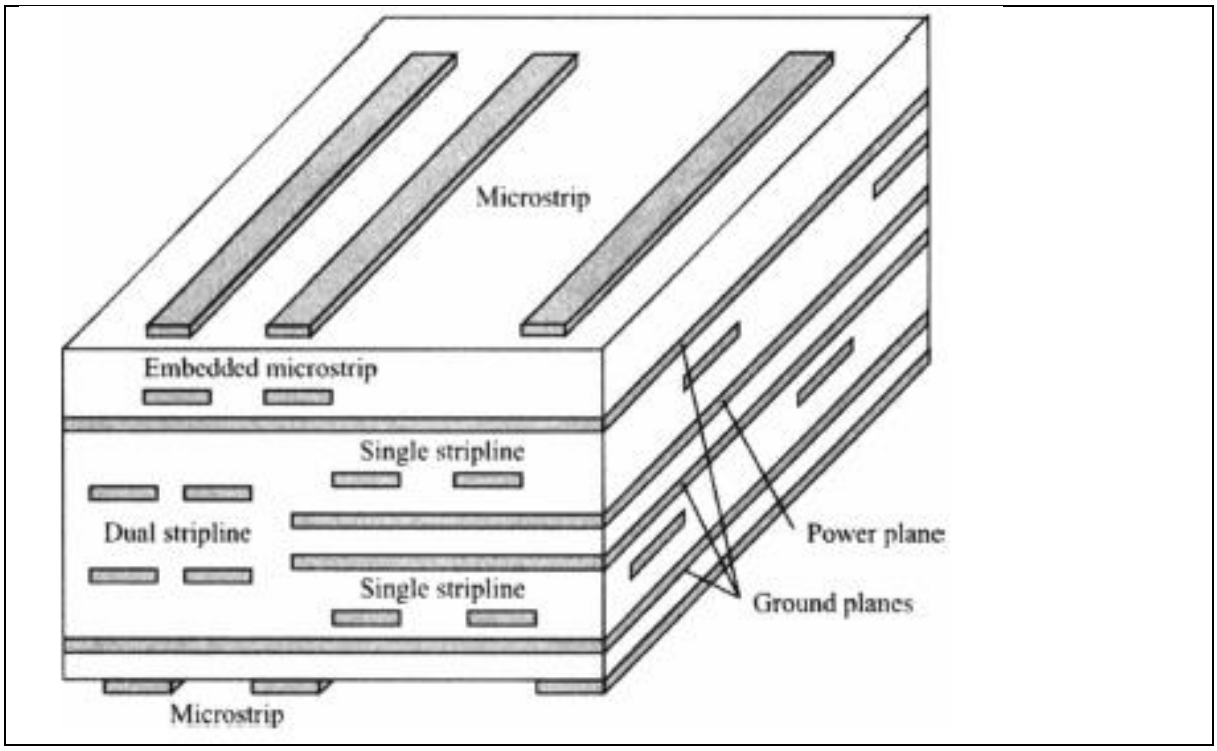
## 1.3 Topologies de routage

### 1.3.1 Introduction

Deux topologies principales sont utilisées lors de la conception des PCB :

- microstrip
- stripline

Une variété on sa basant sur ces deux typologies existent comme le montre la figure suivante :




### 1.3.2 Microstrip

Microstrip fait référence aux traces situées sur le dessus et le dessous, ou sur les couches externes d'un PCB. Microstrip fournit une suppression minimale de l'énergie RF qui peut être créée dans le PCB.

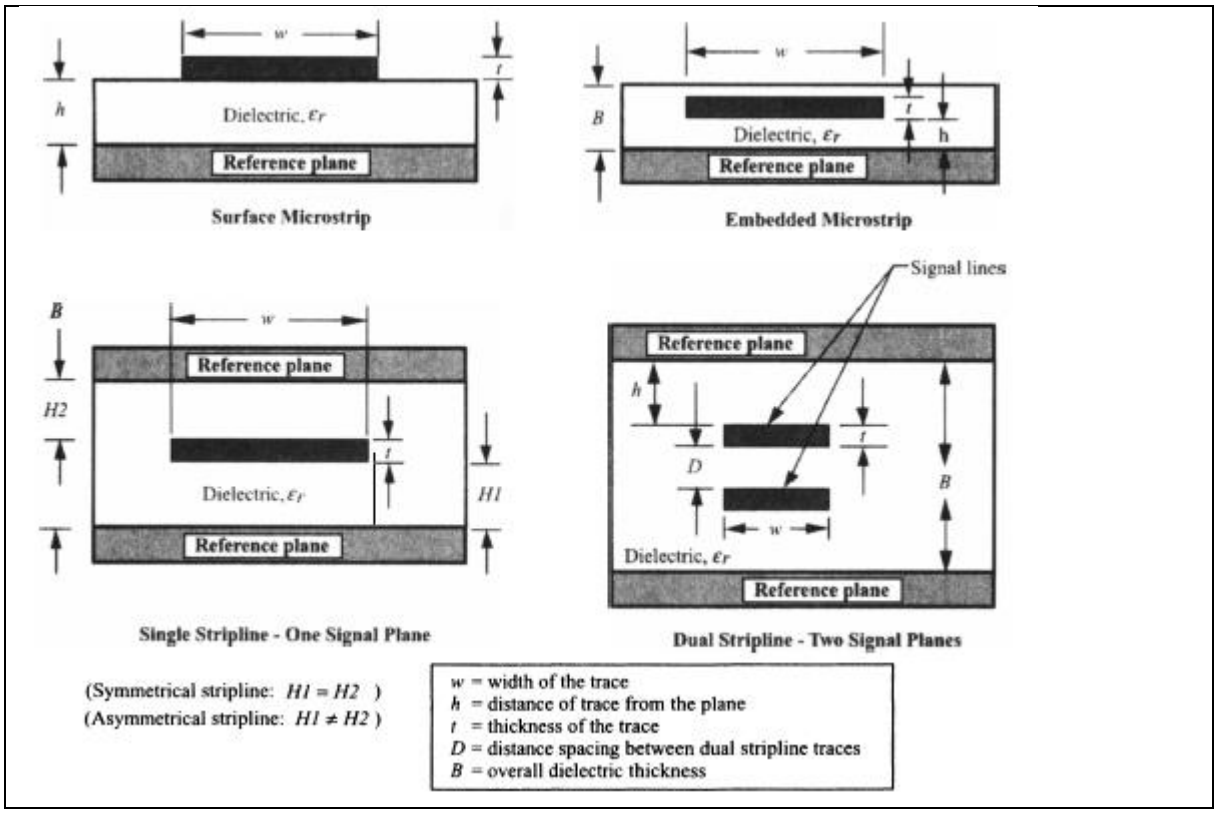
Une propagation plus rapide du signal d'horloge et logique existe par rapport à celle de la configuration tri plaque. Ces signaux plus rapides sont dus à moins de couplage capacitif et à une propagation à vide plus faible délai entre la source et la charge. Les condensateurs sont parfois utilisés sur les signaux d'horloge pour ralentir les transitions de front des signaux numériques. Avec moins de couplage capacitif entre deux plans solides, les signaux peuvent se propager plus rapidement. L'inconvénient de l'utilisation de micro ruban est que les couches externes du PCB peuvent occasionnellement émettre de l'énergie RF dans

l'environnement, sans la protection d'un plan des deux côtés de cette couche de circuit externe (blindage Faraday des côtés supérieur et inférieur des pistes routées).

### 1.3.3 Stripline

Stripline fait référence au placement d'une couche de signal entre deux plans solides: à la tension ou au potentiel de terre. Stripline offre une meilleure immunité au bruit contre la propagation des émissions RF rayonnées, au détriment de vitesses de propagation plus lentes. Étant donné que le plan du circuit (signal) est situé entre des plans solides, le potentiel n'étant pas pertinent, un couplage capacitif existera. Le couplage capacitif entre les plans ralentit le taux de transition des bords à grande vitesse signaux. Des effets de couplage capacitif dans la topologie tri plaque sont observés sur des signaux avec des transitions de front plus rapides que 1ns. Le principal avantage de l'utilisation de la ligne tri plaque est le blindage complet de l'énergie RF générée par les traces internes rayonnant dans l'espace libre.

Exemple d'un PCB STRIPLINE est montré dans la figure suivante :




## 1.4 Les différentes couches « Layers » du PCB

### 1.4.1 Les couches « nombre de Layers »

Lors de la conception d'un circuit imprimé, une considération primordiale est de déterminer combien de couches de routage et de plans d'alimentation sont nécessaires pour la fonctionnalité. Le nombre de couches est déterminé par les spécifications fonctionnelles :

- Immunité au bruit (utilisation de plans de puissance)
- Séparations des catégories de signaux
- Nombre de filets (traces) à router
- Contrôle d'impédance
- densité de composants des circuits individuels
- Routage des bus, etc.

L'utilisation appropriée de la topologie stripline et microruban est requise non seulement pour la suppression des radiofréquences (RF) dans le PCB. Mais aussi à des fins d'intégrité du signal. Si l'intégrité du signal est assurée. les émissions seront également réduites par la suite.

Principalement trois type de PCB sont utilisé :

- Simple Face

- Double Face

- Multicouches

### 1.4.2 Simple face

L'utilisation de circuits imprimés simple face est généralement réservée aux produits ne contenant pas de signaux périodiques (horloge) ou destinés à être utilisés dans des systèmes de contrôle-commande analogiques.

En raison de la capacité limitée à placer les composants de manière optimale pour les courtes longueurs de piste et de la nécessité d'un système d'alimentation et de mise à la terre, une tentative optimale de disposition de la carte doit avoir lieu.

Il est recommandé de réserver l'utilisation de PCB simple face aux circuits fonctionnant en dessous de quelques centaines de kHz. Cette valeur basse fréquence est due à divers aspects de conception liés aux exigences du circuit haute fréquence, y compris l'applicabilité de l'effet de peau sur les traces (les traces deviennent hautement inductives à haute fréquence), l'absence d'un chemin de retour RF approprié lié à la boucle fermée les exigences du circuit et la nécessité d'un contrôle optimal de la boucle de masse

Pour empêcher le développement de champs magnétiques et d'antennes cadres. De plus, les PCB à simple face sont très sensibles aux influences RF externes telles que les décharges électrostatiques, les transitoires rapides et la sensibilité aux RF rayonnées/conduites.

Le besoin de techniques de terminaison et de disposition pour l'intégrité du signal n'est pas une préoccupation majeure, car le taux de transition des bords n'est généralement pas très rapide et les dimensions physiques du PCB dépassent généralement les longueurs de ligne de transmission. De plus, toutes les interconnexions d'E/S fonctionneront parfaitement comme

une antenne rayonnante, en raison de l'absence d'un RF chemin de retour et la nécessité d'une annulation de flux.

L'approche la plus simple pour la conception et l'agencement d'un circuit imprimé simple face consiste à commencer par développer la structure d'alimentation et de masse (traces). Viennent ensuite les signaux à haut risque (horloges), qui doivent être acheminés à côté des traces au sol aussi près que physiquement possible. Après ces deux étapes sont terminées, le reste de la conception peut être finalisé. Les exigences suivantes sont obligatoires :

I. Identifiez toutes les sources d'alimentation et de mise à la terre, ainsi que les réseaux de signaux critiques.

2. Divisez la mise en page en sous-sections fonctionnelles. Tenez compte des exigences des composants sensibles et de leur relation physique avec les ports d'E/S et les interconnexions.

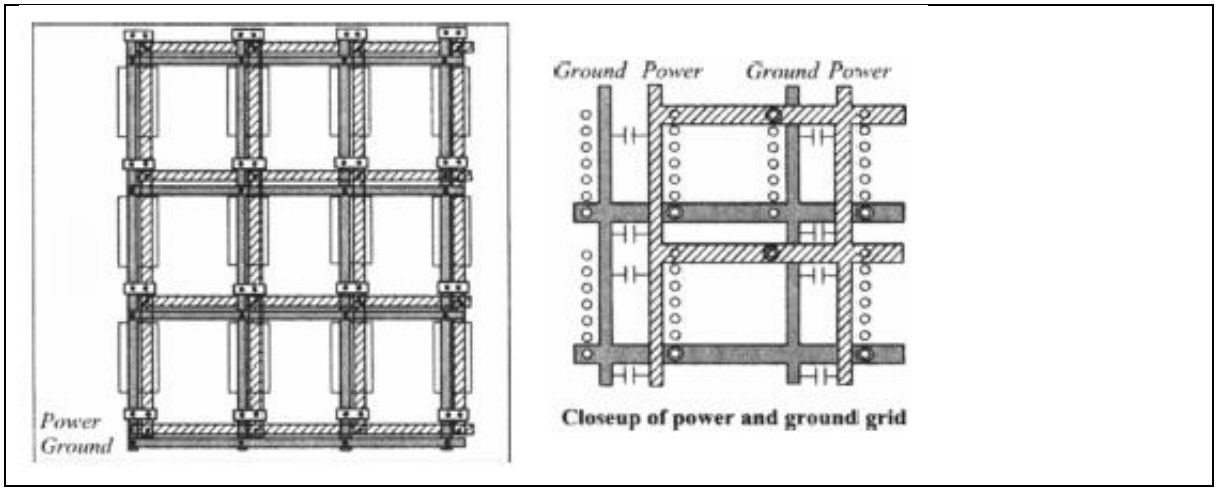
3. Positionnez tous les composants avec des réseaux de signaux critiques adjacents les uns aux autres.

4. Si différents nœuds de terre sont nécessaires, déterminez s'ils doivent être connectés ensemble et, si oui, où.

5. Acheminez le reste de la carte, en gardant à l'esprit la nécessité d'une annulation de flux pour les traces riches en énergie spectrale RF, ainsi que la nécessité de s'assurer qu'un chemin de retour RF est disponible à tout moment.

### 1.4.3 Double face

Il existe deux méthodologies de disposition fondamentales pour les PCB double face. Le premier concerne les produits technologiques plus anciens (composants à vitesse plus lente) qui utilisent des packages DIP (Dual-In Line), situés dans une configuration en ligne droite ou matricielle. Très peu de produits utilisent cette topologie, et on ne les trouve généralement que dans les matrices de mémoire. La figure suivante qui illustre ce type d'aménagement.




Closeup of power and ground grid

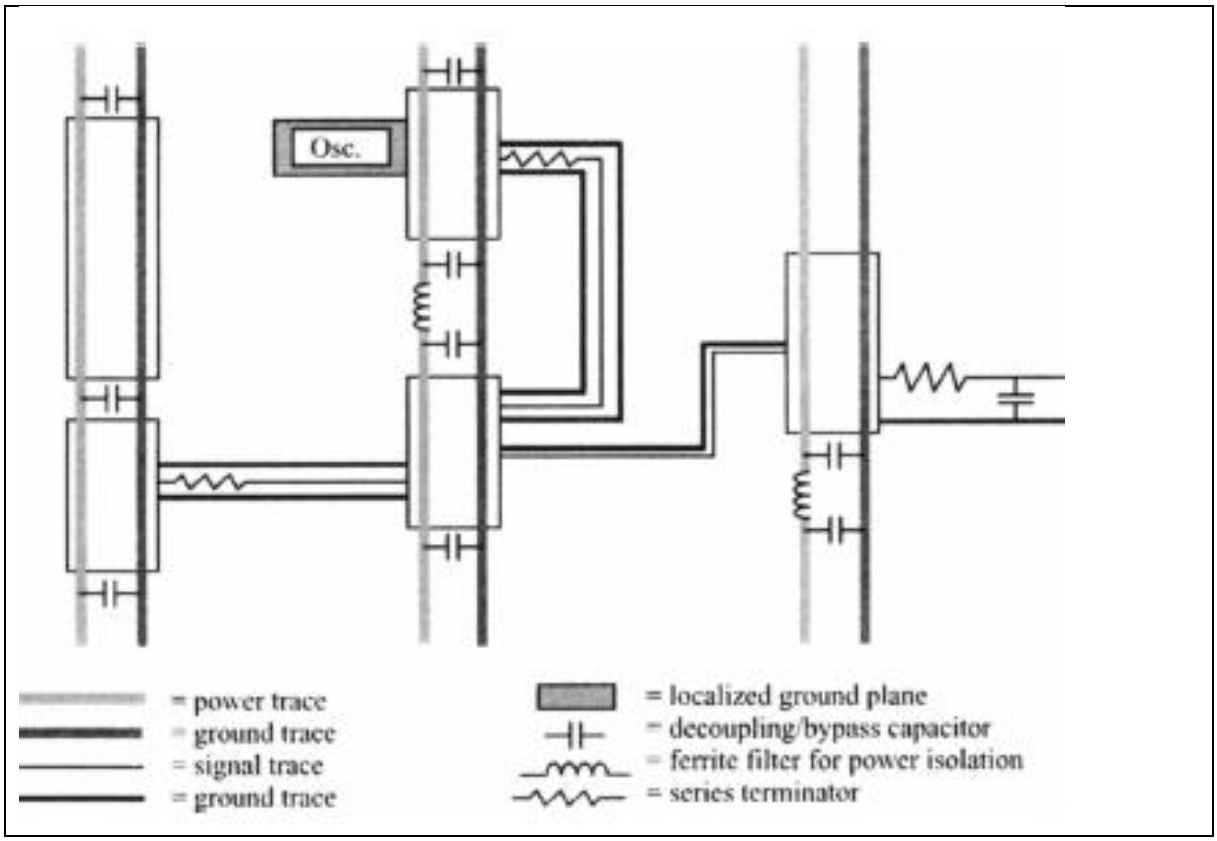
Dans cette configuration on constate que :

1. Dessus du panneau : toutes les traces sont verticales.
2. Bas du panneau : toutes les traces sont horizontales.
3. Les traversées où les lignes de puissance et de terre se croisent.
4. Le condensateur de découplage entre l'alimentation et la masse aux connecteurs est intégrée.
5. Les lignes de signal suivent le modèle vertical/horizontal.

La deuxième configuration est typique des pratiques de conception actuelles. Lorsqu'une méthodologie d'alimentation en réseau et d'implantation au sol est utilisée, il faut veiller à garantir que les réseaux soient reliés entre eux en un maximum d'endroits possible. Si une grille n'est pas fournie, les courants de boucle RF des composants ne trouveront pas de chemin de retour à faible impédance par aucun des moyens fiables, aggravant ainsi les émissions. L'acheminement de l'alimentation et des pistes de retour adjacentes les unes aux autres, en utilisant des routes parallèles, permet l'existence d'une structure de ligne de transmission ou d'une antenne à faible impédance et à petite boucle. Avec une petite zone de boucle, l'énergie RF développée sera à une fréquence si élevée que les signaux mesurés peuvent être dans la gamme supérieure des MHz et ne poseront donc pas de problèmes pour la conformité CEM. Les traces de signal référencées au retour OV peut encore créer des boucles de courant importantes, si l'espacement entre la trace et OV référence est excessivement grand.

L'un des problèmes avec les PCB double face est la façon dont les traces sont acheminées entre les composants lorsqu'il existe une grille d'alimentation et de masse. Dans presque toutes les applications, il devient impossible de quadriller complètement une planche double face. La technique d'agencement la plus optimale consiste à utiliser le remplissage au sol pour remplacer comme chemin de retour alternatif le contrôle de la zone de boucle et l'impédance réduite pour les courants de retour RF. Ce remblai doit être relié au point de référence OV en autant d'endroits que possible. La deuxième configuration est typique des pratiques de conception actuelles.

La deuxième méthodologie pour les PCB double face est identique à celle de la première mais la seule différence réside dans le routage des pistes d'alimentation et de masse sur les couches supérieure et inférieure. En ayant deux couches disponibles, le routage devient plus facile à réaliser, avec les zones de boucle restant aussi réduites que possible voir figure suivante).




### 1.4.4 PCB Multicouche :

**A°/ PCB à quatre faces :**

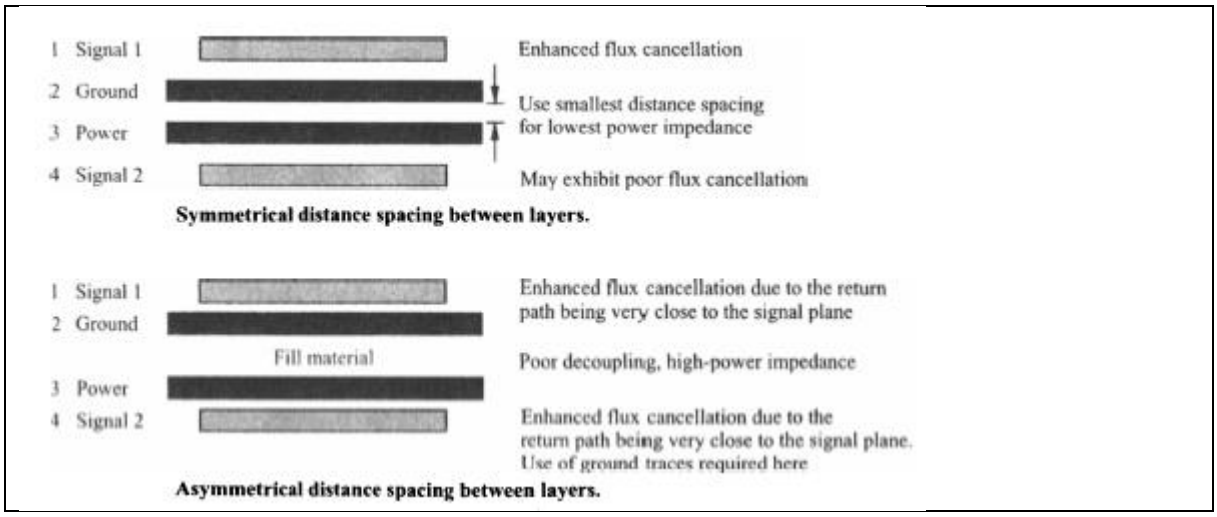
Il n'y a qu'une seule façon optimale d'effectuer un empilement à quatre couches qui fonctionne bien pour la conformité EMC, bien que deux configurations soient possibles, chacune avec deux options : symétrique et asymétrique. L'utilisation de plans de référence améliore la capacité d'annulation de flux de Courants RF. La distance physique entre la couche de signal et le plan de référence est bien inférieure à celle des cartes double face ; par conséquent, l'énergie RF rayonnée est réduite. Un assemblage à quatre couches n'est toujours pas optimal pour l'annulation de flux des courants RF créés par les circuits et les traces. La raison est la même que pour la carte double face - l'espacement de distance physique entre la trace source et le retour chemin est encore excessivement large comme le montre la figure suivante :

- 1ère configuration - Espacement de distance symétrique :

Dans cette configuration on trouve :

- Première couche (côté composants) - signaux et horloges
- Deuxième couche-plan de masse.
- Plan d'alimentation de troisième couche
- Quatrième couche : signaux et horloges

Cette configuration est présentée par la figure suivante :

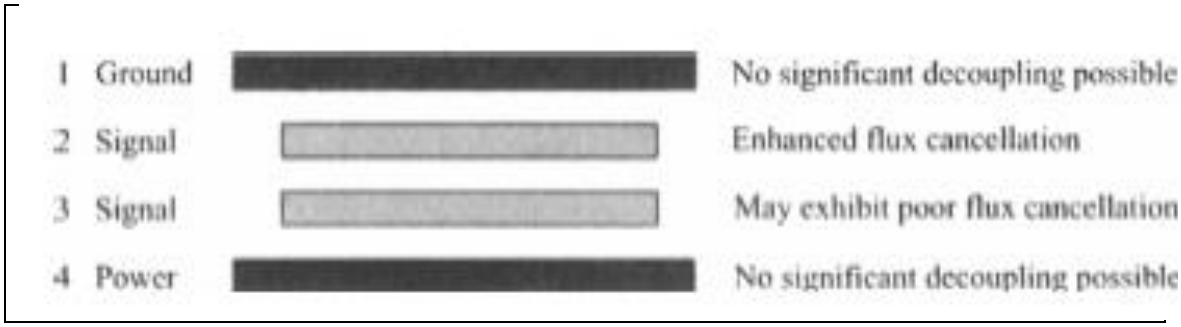



- 2ème configuration : Espacement de distance asymétrique :

Dans cette configuration on trouve :

- Première couche (côté composant) - signaux et horloges
- Deuxième couche-plan de masse
- Matériau de remplissage
- Plan d'alimentation de troisième couche
- Quatrième couche (en bas) - signaux et horloges

Cette configuration est présentée par la figure suivante :




**B°/ PCB à six faces :**

Dans ce mode Trois configurations sont couramment trouvées dans les conceptions de produits, bien que d'autres configurations soient possibles en fonction de l'utilisation et de l'application prévues.

- 1ère configuration :

• Première couche (côté composant) - couche de routage microruban

• Couche de routage microruban intégrée dans la deuxième couche

• Troisième couche-plan de masse

• Plan d'alimentation de la quatrième couche

• Cinquième couche : couche de routage microruban intégrée

• Sixième couche (inférieure) - couche de routage microruban

Cette configuration donne une puissance/impédance de plan de masse plus faible qu'un assemblage à quatre couches. Cette impédance plus faible améliore le découplage global des composants. Le plan de routage (Couche 2) adjacent au plan de masse est privilégié pour le routage des traces riches en Énergie spectrale RF . Bien que la couche de routage alternative pour d'autres signaux à haut risque, la couche 5, soit disponible, des dispositions doivent être prises pour s'assurer qu'un chemin de retour RF existe pour toutes les traces acheminées sur la couche 5. Les deux couches de microruban externes sont inappropriées pour acheminer tout traces sensibles à un événement RF induit de l'extérieur (par exemple, décharge électrostatique, transitoire électrique rapide) .

- 2ème configuration :

• Première couche (côté composant) - couche de routage microruban

• Deuxième couche-plan de masse

• Troisième couche de routage stripline

• Quatrième couche de routage stripline

• Plan d'alimentation de cinquième couche

• Sixième couche (inférieure) - couche de routage microruban

Les avantages et les inconvénients de cette affectation d'empilement dépendent de la manière dont la conception doit être mise en œuvre, ainsi que des problèmes d'intégrité du signal. Les avantages incluent une valeur d'impédance plus faible entre les couches de routage (intégrité du signal améliorée), ainsi qu'un effet de blindage des avions pour empêcher l'énergie RF de se propager dans l'environnement. Un inconvénient est qu'il n'y a pratiquement pas de découplage entre l'alimentation et le plan de masse. Par conséquent, un nombre important de condensateurs discrets sera nécessaire, ce qui augmentera le coût des matériaux tout en prenant de l'espace lors du placement. Bien que l'auto-blindage se produise en raison des plans tri-plaques, le rayonnement des composants sera toujours présent.

- 3ème configuration :

• Première couche (côté composant) - couche de routage microruban

- Plan d'alimentation de deuxième couche
- Troisième couche-plan de masse
- Plan de routage de quatrième couche-stripline
- Cinquième couche-plan de masse
- Sixième couche (inférieure) - couche de routage microruban

La configuration 3 est un type différent d'empilement de couches, avec trois plans de routage et trois plans de référence. Cette configuration n'est pas réaliste en raison du surcoût important des couches de cuivre massif (50%). Cette affectation d'empilement est loin d'être optimale. Il est courant de construire des PCB avec une symétrie entre les couches. Le but de discuter de cet agencement d'empilement est d'illustrer un concept.

# 2 Placement des composants dans un PCB

## 2.1 Introduction

La conception de PCB est composée à 90% de placement et à 10% de routage. Bien que les chiffres réels n'aient aucune importance, le concept selon lequel le placement des composants est de loin l'aspect le plus important de la disposition d'une carte est certainement vrai. Un bon placement des composants facilitera le travail de mise en page et donnera les meilleures performances électriques. Un mauvais placement des composants peut transformer le travail de routage en cauchemar et donner de mauvaises performances électriques. Cela peut même rendre la carte impossible à fabriquer. Il y a donc beaucoup à penser lors du placement des composants.

Chaque concepteur aura sa propre méthode de placement des composants, Il n'y a donc pas de bonne façon absolue de placer des composants. Mais il existe un certain nombre de règles de base qui nous aideront à faciliter notre routage, et à nous offrir les meilleures performances électriques et à simplifier les conceptions volumineuses et complexes.

Beaucoup de concepteur aiment placer directement tous les composants dans ce qu'ils pensent être la position la plus optimale sur la planche, le tout d'un seul coup. Bien que cela puisse fonctionner pour de petits circuits, mais ça ne peut pas marcher avec des circuits plus complexes avec des centaines de composants répartis sur de nombreux circuits fonctionnels. Car il est très facile de manquer d'"espace de routage", qui est l'espace pour déposer toutes les pistes. Donc si on fixe toutes les positions des composants et essayer ensuite de tout router, alors facilement on se retrouver avec une grande carte qui n'utilise pas efficacement l'espace.

La marque de fabrique d'un concepteur inexpérimenté est une carte dont tous les composants sont espacés uniformément, puis des milliers de pistes et de voies qui s'entrecroisent sur la carte. Cela peut fonctionner, mais cela peut être moche et inefficace, sans parler du plus gros et du plus cher à fabriquer..

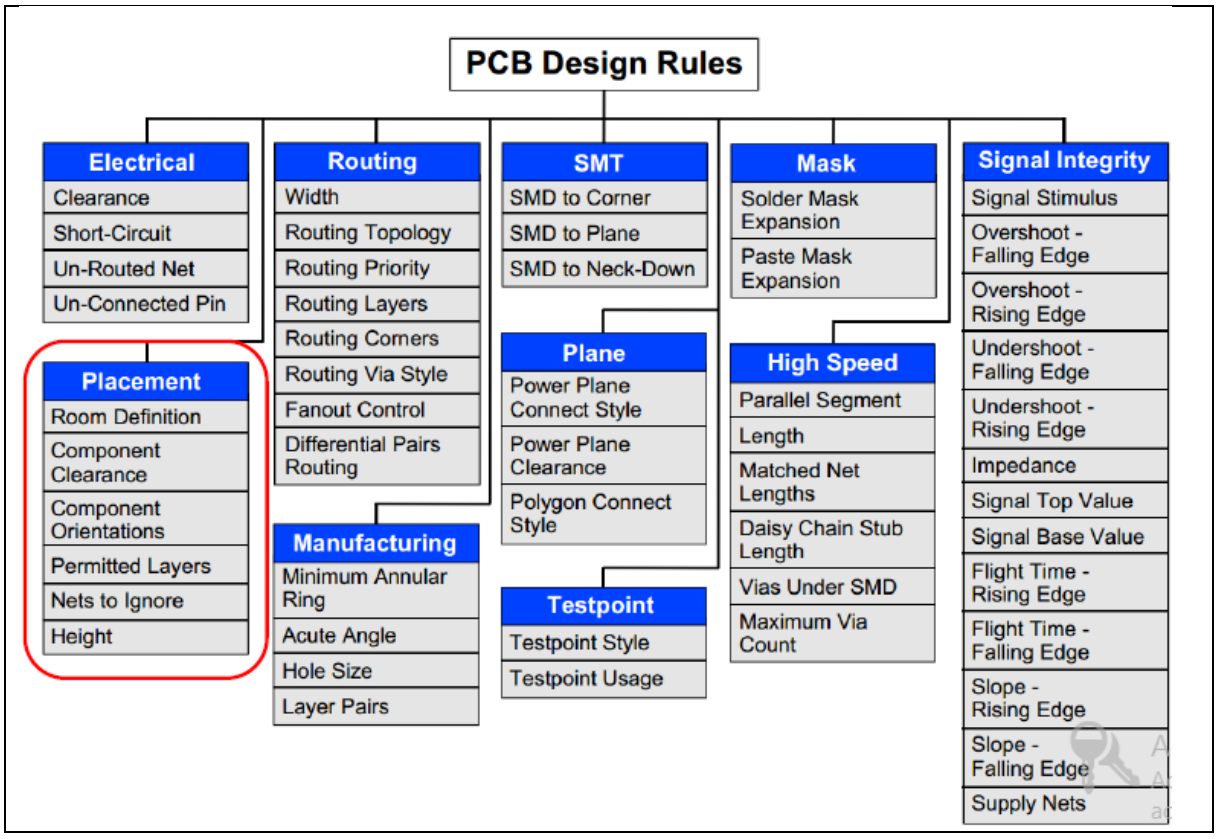
## 2.2 Règles de placement des composants dans un PCB

- Bien choisir sa grille
- Définir les différentes zones et toutes les contraintes :
  - Bords de cartes,
  - Contraintes de flexion,
  - Contraintes thermiques,
  - Contraintes de hauteur,
  - Zones connectiques spécifiques,
  - Zones de fixation,
  - Perçages et découpes

- Poser tous les composants sur le PCB
- Placer et verrouiller les composants, perçages, découpes imposés mécaniquement
- Poser le découplage à proximité du composant associé
- Diviser et placer en blocs fonctionnels « faire du lego » :
  - Placer par blocs en dehors de la carte
  - Poser les blocs pour optimiser leur placement sur la carte (orientation, disposition)
  - Les router en dehors de la carte
  - Finir par l'assemblage de tous les blocs

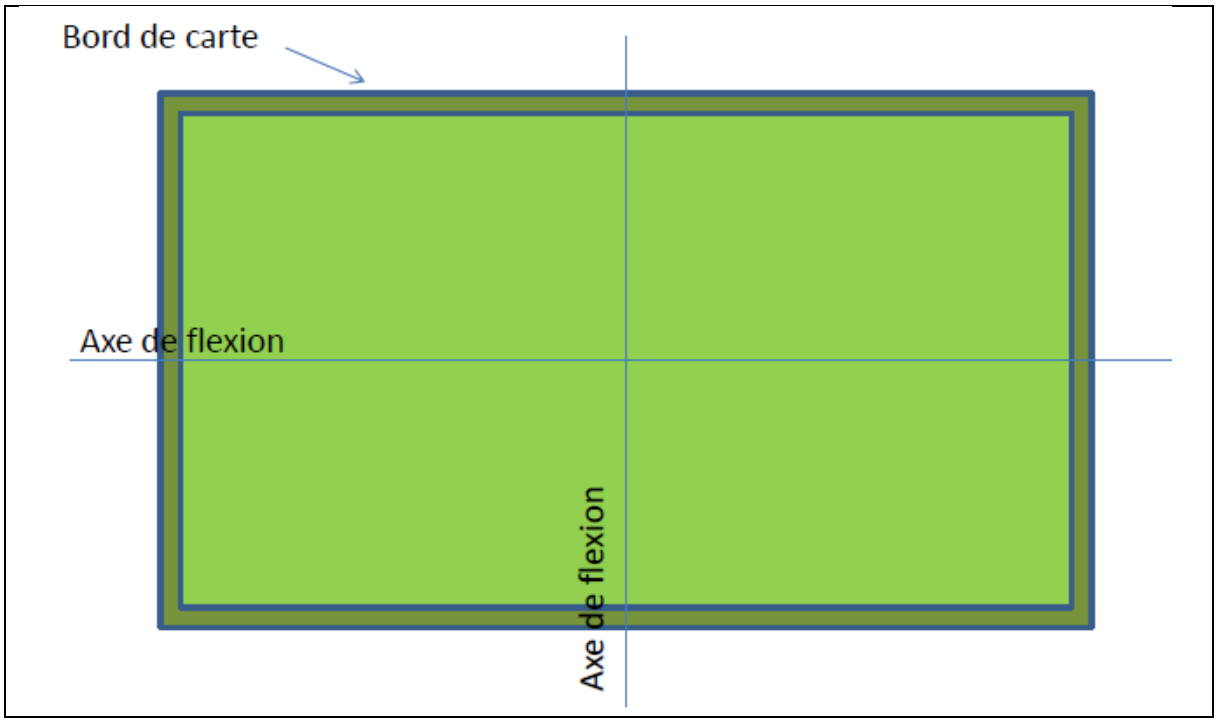
- Identifier les signaux critiques pour optimiser leur placement et faciliter leur routage :
  - Horloges,
  - Paires différentielles,
  - Impédances contrôlées,
  - Longueurs accordées ( DDR )

Selon quelque développeur de logiciel de CAO électronique voici la stratégie adopté pour placer les composants présenté dans la figure suivante :

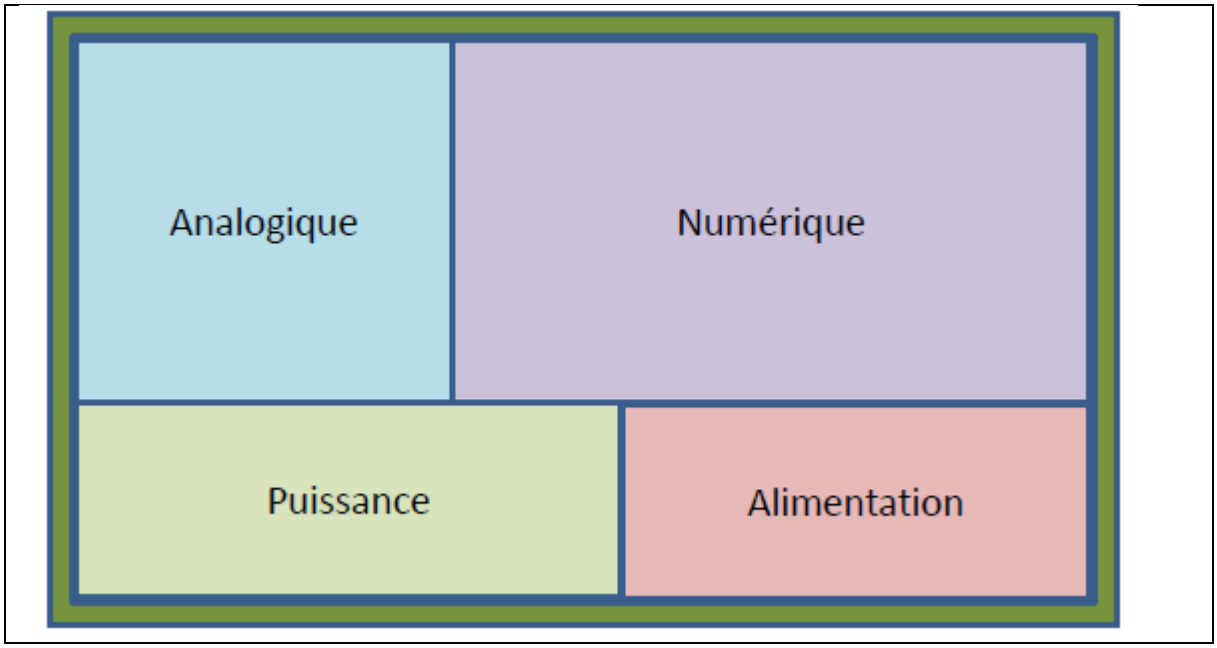



Dans un placement de composant il faut établir des zones particulières en effet pour les bords de la carte il faut réserver une zone sans composants sur la périphérie de même il faut éviter de poser les composants les plus hauts vers le bord de carte Par contre dans Les zones de flexion il faut éviter les boitiers sensibles aux contraintes en flexion (BGA, QFN) et éviter les

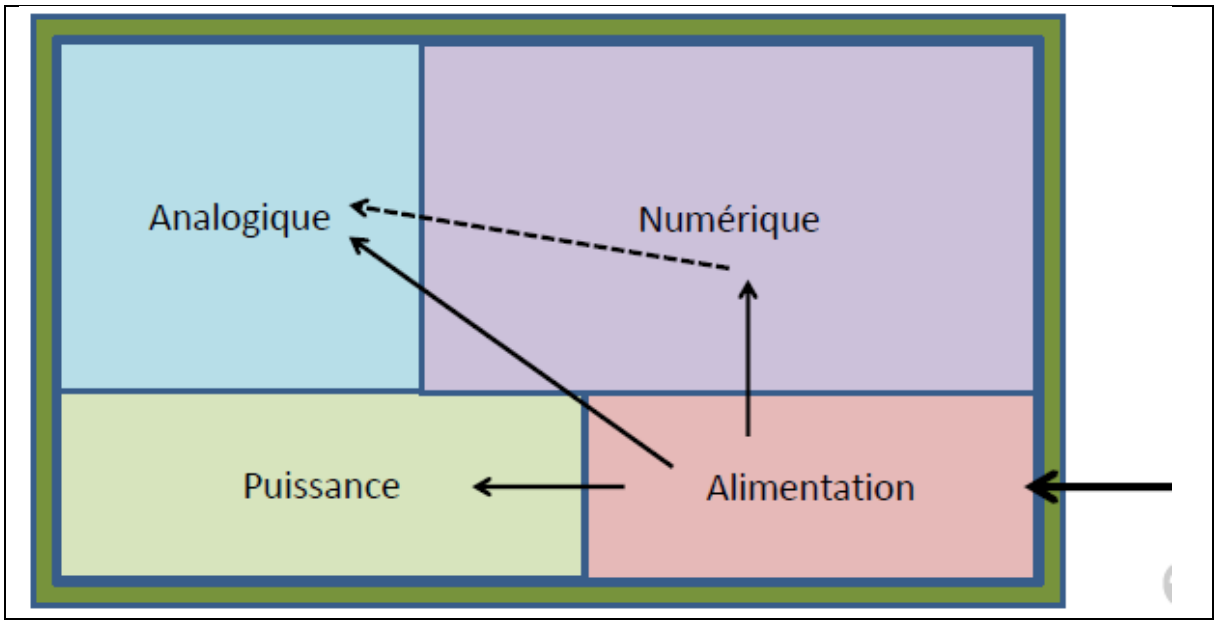
connecteurs réclamant un grand effort de connexion/déconnexion. D'une manière générale la figure suivantes montre les différentes zones et axe qui sera utilisé pour le placement des composants sur la carte électronique.




D'une manière générale il faut mieux diviser la carte de cette manière comme le montre la figure suivante :



Le flux d'alimentation sera géré alors de cette manière :




Le placement correct des composants pour une fonctionnalité optimale et la suppression EMC est important dans n'importe quelle configuration. La plupart des conceptions intègrent des sous-sections fonctionnelles ou des zones par fonction logique.

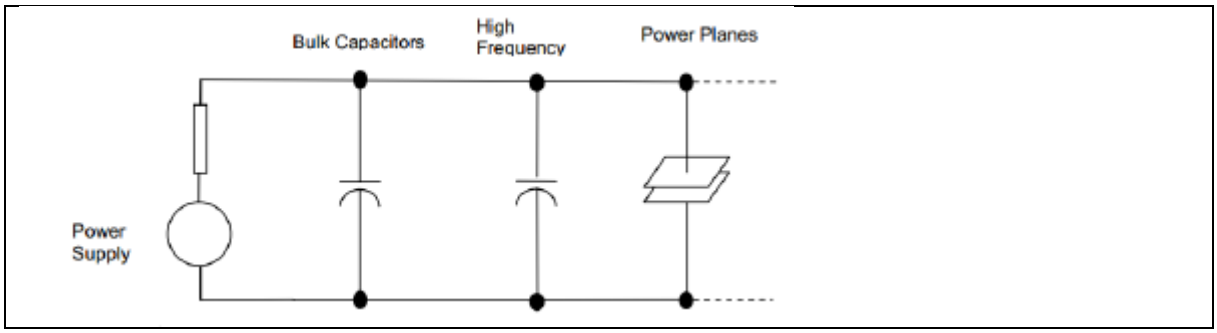
Le regroupement des zones fonctionnelles minimise la longueur de la trace du signal, le routage et la création d'antennes.

Le placement correct des composants facilite également le routage des traces, améliorant ainsi l'intégrité du signal.

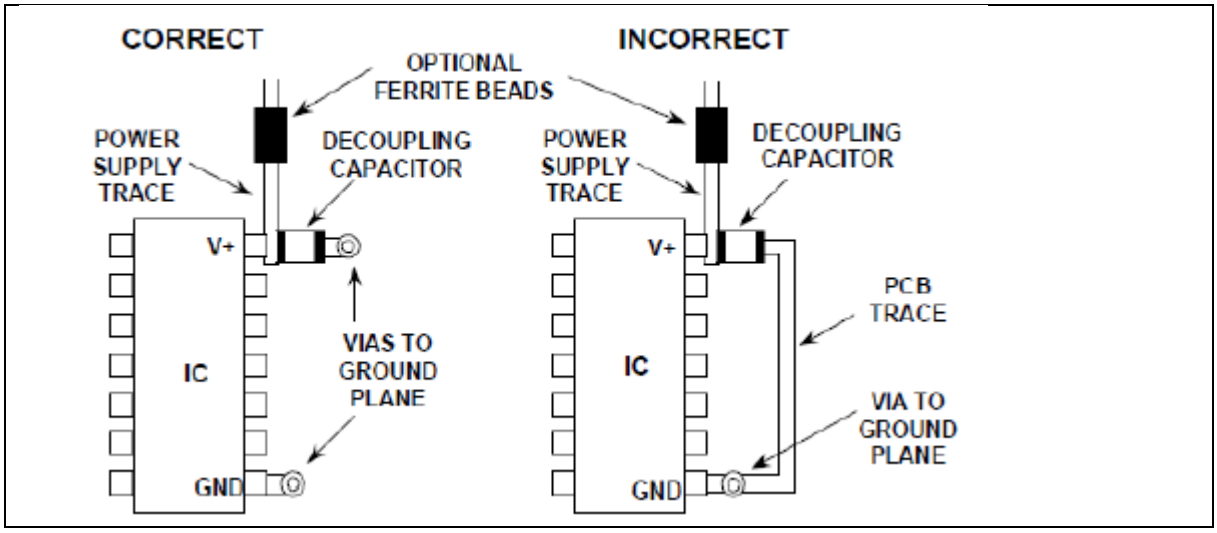
L'utilisation intensive des connexions par point de masse du châssis est une méthode de qui peut être mise en œuvre. Pour la conception à haute fréquence et de haute technologie nécessitent de nouvelles méthodologies de collage plan de masse à la masse du châssis. La mise à la terre multipoint répartit efficacement les courants de mode commun qui émanent entre les différentes sections de la conception. Ce partitionnement maintient également le couplage des courants RF d'une section à d'autres sections. Les produits avec des horloges supérieures à 50 MHz nécessitent généralement des connexions de point de masse fréquentes à la masse du châssis. Cette mise à la terre minimise les effets des courants de mode commun et des boucles de masse présentes entre les sections fonctionnelles. Au moins quatre points de masse entourent chaque section. Ces points de base illustrent la mise en œuvre optimale du maintien d'un rapport d'aspect optimal autour des sections fonctionnelles, bien que ce ratio ne soit pas toujours économiquement réalisable.

## 2.3 Le découplage VCC/GND dans PCB

Le découplage est toujours cherché pour minimiser les boucles de courant comme e montre la figure suivante :

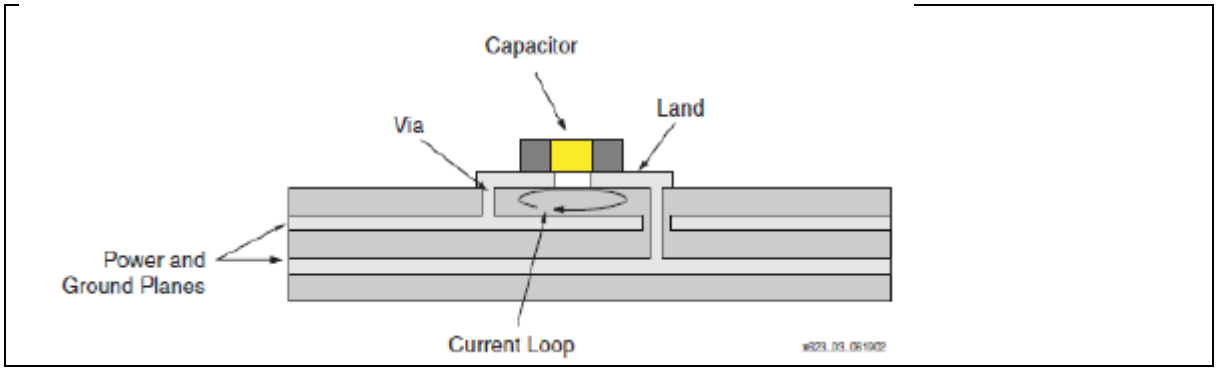



E pratique la figure suivante montre le découplage correct d'un circuit intégré :




Remarque :

Attention aux vias, essayer respecter la règle : 1 condensateur de découplage / 1 paire de vias comme le montre la figure suivante :

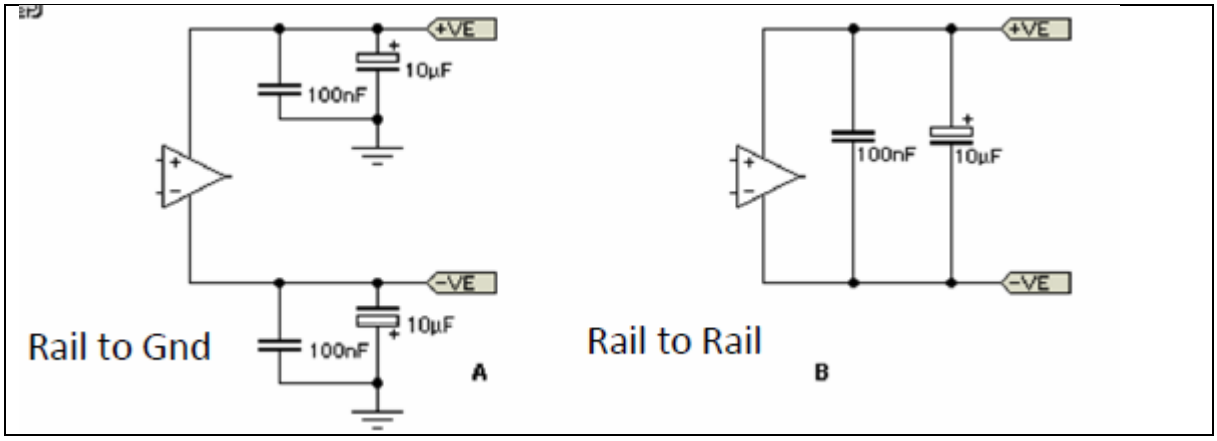


Pour les circuits analogiques le découplage se fait de deux manières différentes :

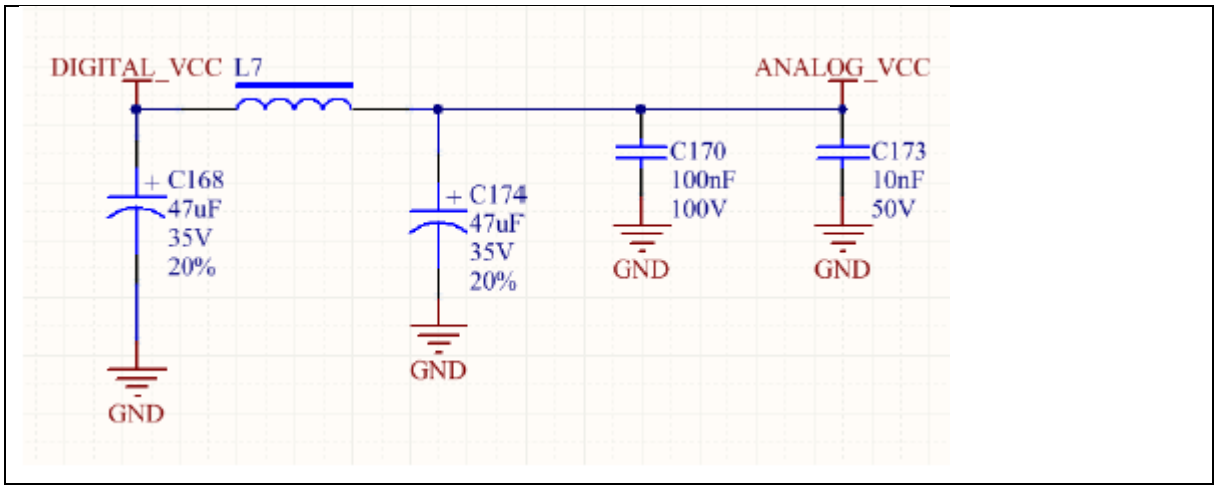
Méthode « rail to gnd » : La plus courante et souvent la plus performante

Méthode « rail to rail » : Moins de condensateurs mais plus haute tension de service

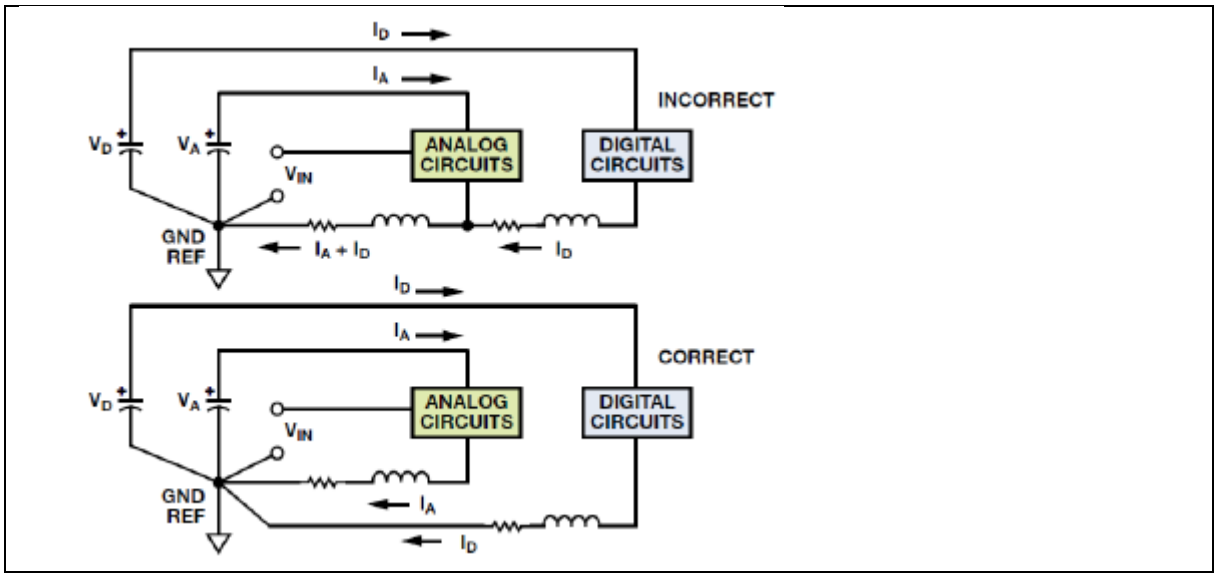
La figure suivante illustre les deux méthodes :



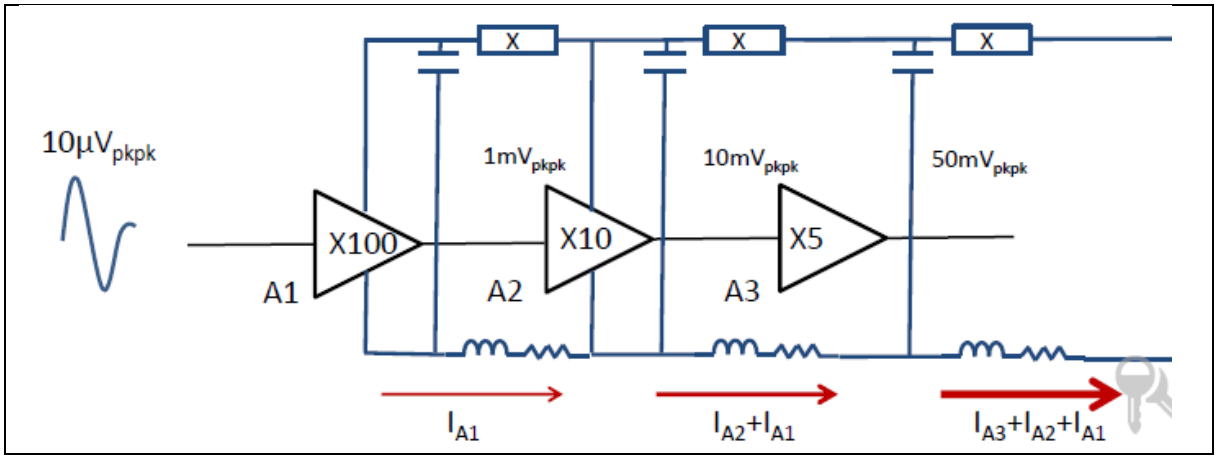

Le découplage d'un circuit numérique d'un circuit analogique se fait de telle sorte qu'en essaie de « casser » le bruit venant du numérique par une inductance (typique : perle ferrite / self de choc) comme le montre la figure suivante :




On organise les alimentations de façon à minimiser l'influence des éléments bruyants (numérique) comme suit :




De même à l'intérieur de l'analogique, On part des éléments les plus sensibles vers les moins sensibles pour rejoindre les rails d'alimentation comme suit :




## 2.4 Le Plan d'alimentation dans un PCB

Il est recommandé d'utiliser des "plans de masse" pour répartir la puissance sur les cartes. L'utilisation de plans d'alimentation peut réduire considérablement l'inductance et l'impédance du câblage d'alimentation des composants. Cela peut être vital pour la conception numérique à grande vitesse par exemple. C'est une bonne pratique de conception d'utiliser des plans de masse chaque fois que possible. Ils peuvent même être utilisés sur des cartes double face, si la plupart des pistes de signal se trouvent sur la couche supérieure.

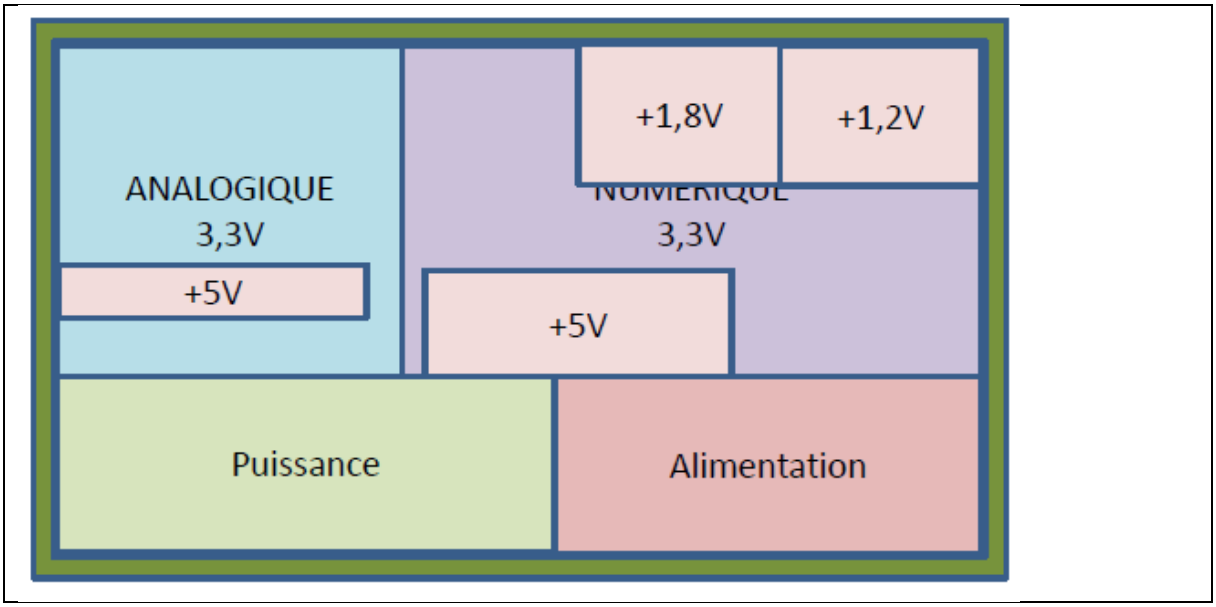
Un plan de masse est essentiellement une couche de carte en cuivre massif dédiée aux rails de masse ou d'alimentation, ou aux deux. Les plans de masses vont dans les couches

intermédiaires de la carte, généralement sur les couches les plus proches des surfaces extérieures.

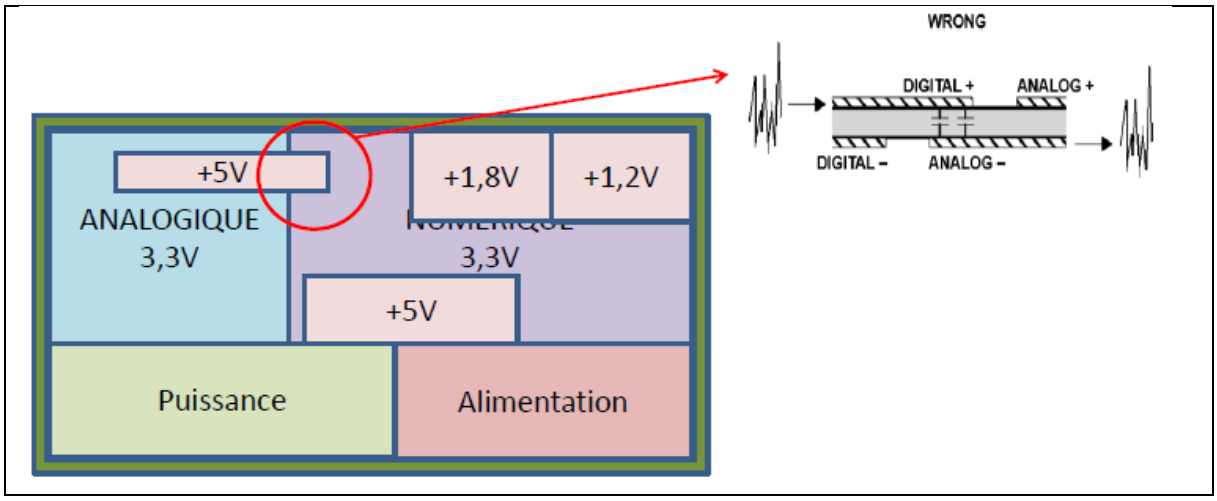
Sur une carte à 4 couches avec des exigences d'alimentation complexes, il est courant de dédier une couche au plan de masse et une autre couche à au différentes pistes d'alimentation positives et négatives. les rail au GND constituent généralement les lignes de référence de signal, donc un plan de masse est la première préférence avant qu'un plan d'alimentation ne soit envisagé.

De nombreux packages PCB ont des couches Power Plane spéciales qui sont conçues et disposées à l'envers des autres couches de suivi normales.

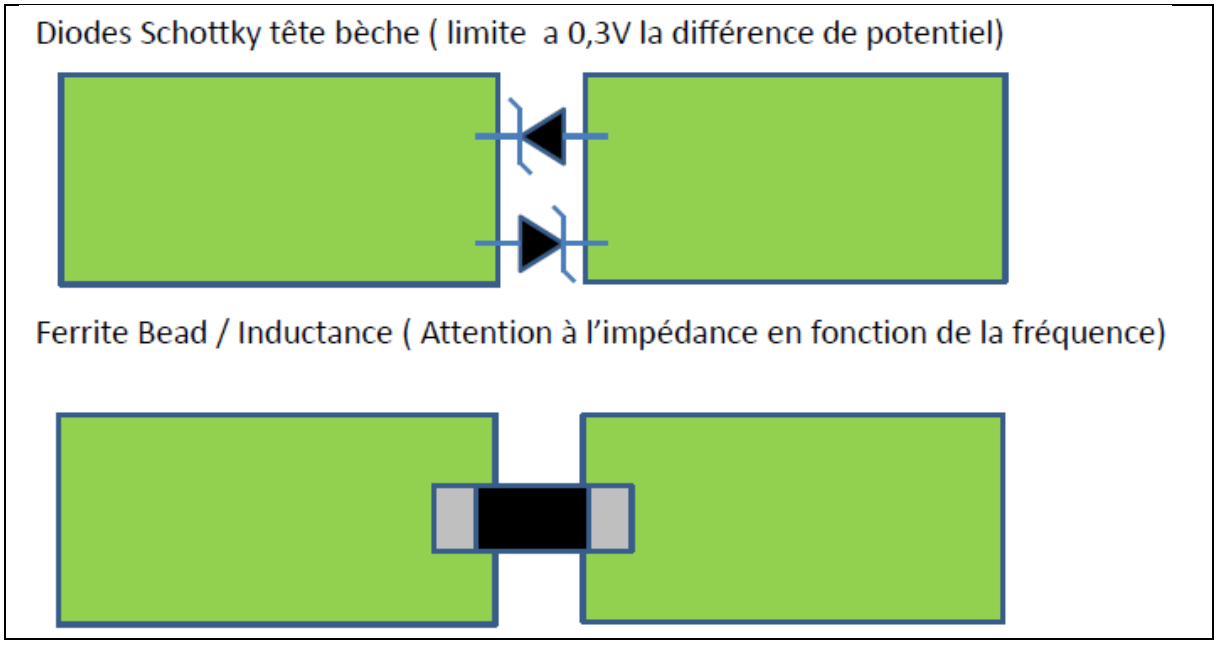
Il faut bien séparer les plans d'alimentation du circuit analogiques par rapport aux circuits numériques comme le montre la figure suivante :




La contrainte la plus importantes dans la disposition de ces plans est d'éviter les couplages capacitives entre deux plans de nature différente tel que montrée dans la figure suivante :

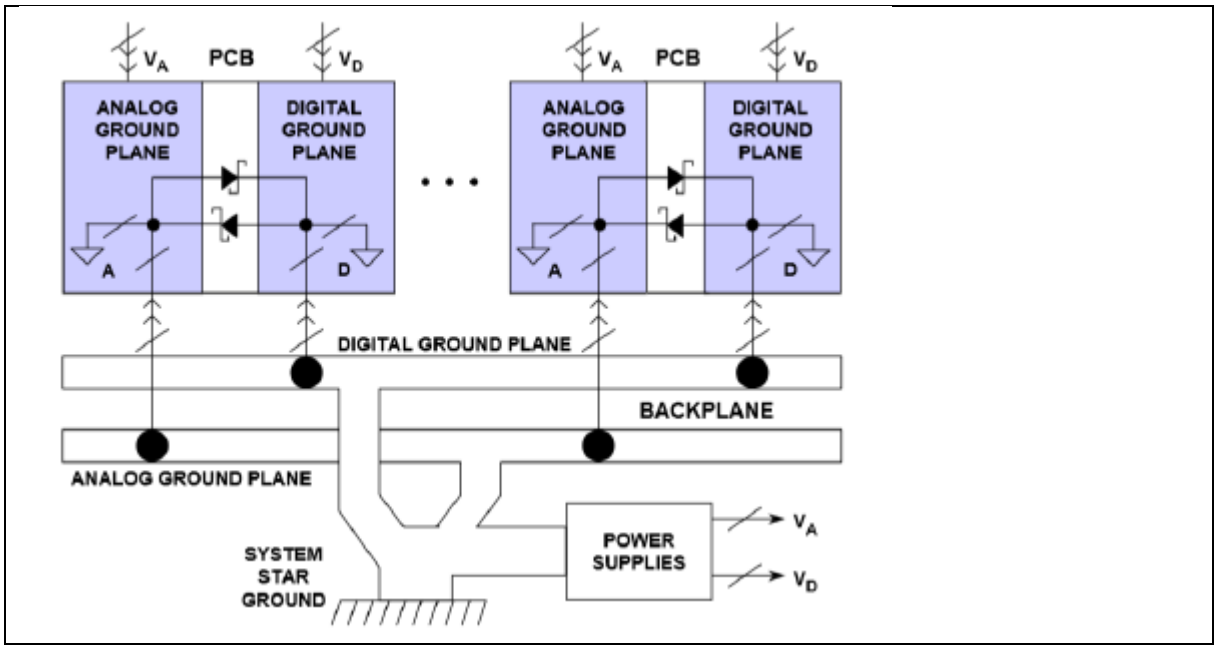



Pour éviter tous problèmes il est nécessaire de relier les plans de masse numérique avec ceux de la partie analogique comme le montre la figure suivante :



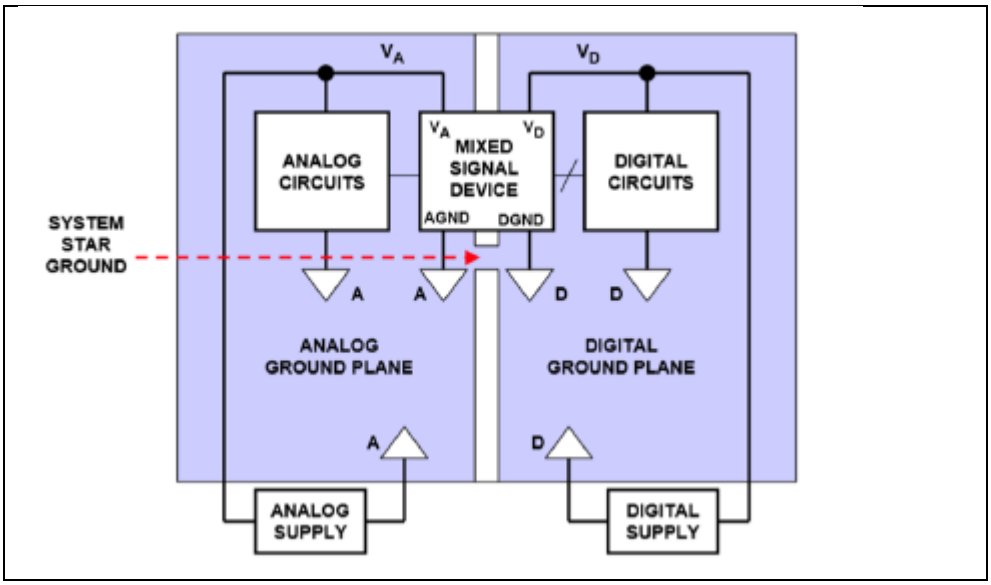

Remarque 1:

Si on dispose de plusieurs PCB on peut lier les deux parties (numérique et analogiques ainsi que les différents PCB) comme le montre la figure suivante :




Remarque 2 :

Dans le cas où on utilise des convertisseurs numériques analogiques et des convertisseurs analogiques numérique on utilise alors la technique illustrée par la figure suivante :




## 2.5 Le routage d'un PCB

Avant de commencer le routage Deux points capitaux ne doivent pas être oubliés : l'espacement entre les pistes et la largeur des pistes.

Deux conducteurs trop proches peuvent entraîner un arc électrique (en particulier si leur différence de potentiel est élevée). D'autre part, si la largeur des pistes (ou des pastilles) n'est pas suffisante, cela peut provoquer un échauffement anormal pouvant entraîner la destruction du circuit. Les prescriptions des tableaux suivant doivent absolument être respectées.

### 2.5.1 Encombrement des composants

Le tableau suivant résume l'écartement qui doit être respecté selon la puissance des composants :

| Composants | Encombrement (en pas de 2,54 mm) |
|---|---|
| Résistances 1W | Ecartement: 8<br>Largeur: 2 |
| Résistances *1/2* W ou 1/4W | Ecartement: 6<br>Largeur: 1 |
| Condensateurs plastiques 2,2 nF à 100 nF / *63V* | Ecartement: 2 pas |
| Transistors | 2 pas entre chaque broche |
| Circuits intégrés | 1 pas entre chaque broche (largeur: 3 pas pour les C.I. de moins de 18 broches) |

Tableau 1 : Encombrement des composants

### 2.5.2 Intensité admissible dans une piste

Le tableau suivant résume l'intensité admissible dans une piste pour ne pas avoir des microcoupure pendant les phases de fonctionnement de la carte à cause d'un surchauffe de la piste ou une demande assez importante de courant qui engendre un décollement de la piste du PCB .

| Largeur des pistes (en mm) | | Intensité à température admissible (en A) | |
|---|---|---|---|
| CU 35 µm | CU 70 µm | 20°C | 30°C |
| 0.35 | | 1.2 | 1.8 |
| 0.4 | | 1.3 | 1.9 |
| 0.72 | 0.36 | 2.7 | 3.5 |
| 1.14 | 0.6 | 3.8 | 4.6 |
| 1.78 | 0.6 | 5.2 | 5.8 |
| 2.5 | 0.9 | 6.8 | 8.2 |
| 3.5 | 1.75 | 8.3 | 10.5 |
| 4.5 | 2.3 | 9.7 | 12 |
| 5.8 | 2.9 | 11.2 | 14 |
| 7.1 | 3.5 | 13 | 16.1 |

Tableau 2 : Intensité admissible dans une piste

### 2.5.3 Choix de l'écartement des pistes

Le choix de l'écartement des piste se fait en fonction de la tension appliquer sur les composants . les différents écartement sont donnée dans le tableau suivant :

| Tension (en V) | Ecart mini (en mm) |
|---|---|
| 0 à 50 | 0,5 |
| 50 à 100 | 0,7 |
| 100 à 170 | 1,0 |
| 170 à 250 | 1,2 |
| 250 à 500 | 3 |

Tableau 3 : Choix de l'écartement des pistes

### 2.5.4 Dimensions des pastilles en fonction des diamètres de perçage

Les dimensions des pastilles est un choix très important dans le développement du PCB en effet, un mouvais choix peut conduire à un détachement totale de la pastille pendant les phases de perçage ou à l'inverse la pastille peut engendre des perturbations lorsque elle se rapproche des pistes. Le tableau suivant nous résume le critère de choix :

| ⌀ foret | ⌀ pastille mini | ⌀ pastille optimale |
|---|---|---|
| D <0.8 mm | 1.39 mm | 1.98 mm |
| 0.8 < D <1.3 mm | 1.98 mm | 2.54 mm |

Tableau 4 : Dimensions des pastilles en fonction des diamètres de perçage

### 2.5.5 Diamètre de perçage des trous de composants

Le diamètre de perçage des trous et donnée dans le tableau suivant :

| Composant | ⌀ du fil(en mm) | ⌀ foret (en mm) |
|---|---|---|
| Résistance 1/4 W | 0.5 | 0.8 |
| Résistance 1/2 W | 0.7 | 0.8 |
| Résistance 1 W | 1 | 1.1 |
| Résistance 2 W | 1.1 | 1.3 |
| Condensateur | 0.5 à 0.8 | 0.8 ou 1.1 |
| Diode et transistor de faible puissance | 0.5 ou 0.6 | 0.8 |
| Circuit intégré | 0.6 | 0.8 |

Tableau 5 : Diamètre de perçage des trous de composants

## 2.6 Implémentation des composants dans un PCB

### 2.6.1 Introduction

Plusieurs stratégie sont utilisé pour placer les composants dans un PCB citons parmi elles :

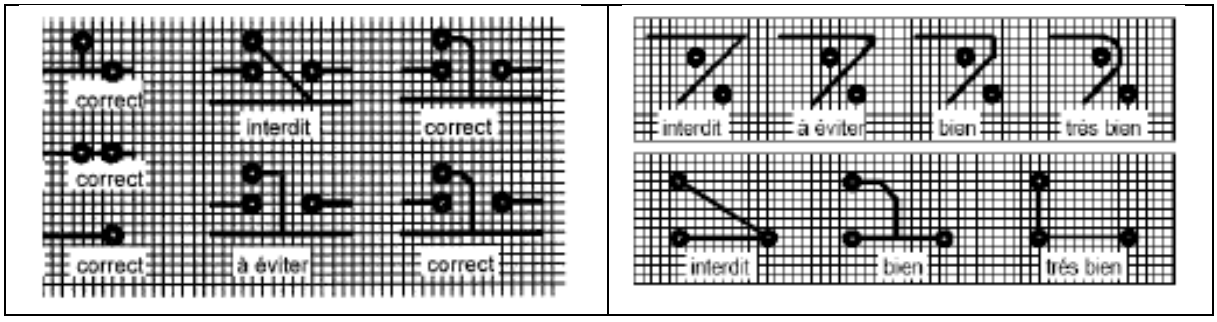
- il faut implanter les composants les plus gros et ceux qui possèdent un nombre de broches importants. Les autres composants seront placés autour de façon astucieuse. D'autre part si le circuit électronique peut être décomposé en sous-fonction, les composants réalisant chaque sous-fonction pourront être regroupés. Ainsi, la carte sera plus lisible pour opérer un éventuel dépannage.
- Les pistes seront disposées soit horizontalement, soit verticalement, soit à 45° (soit en arrondi - quart de cercle -) . Les angles de 90° sont à éviter (cf. figure 1). Les pistes peuvent passer sous les composants (sauf pour les transistors).
- Les pastilles devront nécessairement être implantées à l'intersection d'une ligne verticale et d'une ligne horizontale de la grille. Chaque broche de composants doit avoir sa pastille de cuivre. Il est interdit de placer les broches de deux composants dans le même trou, sous prétexte qu'elles doivent être reliées.

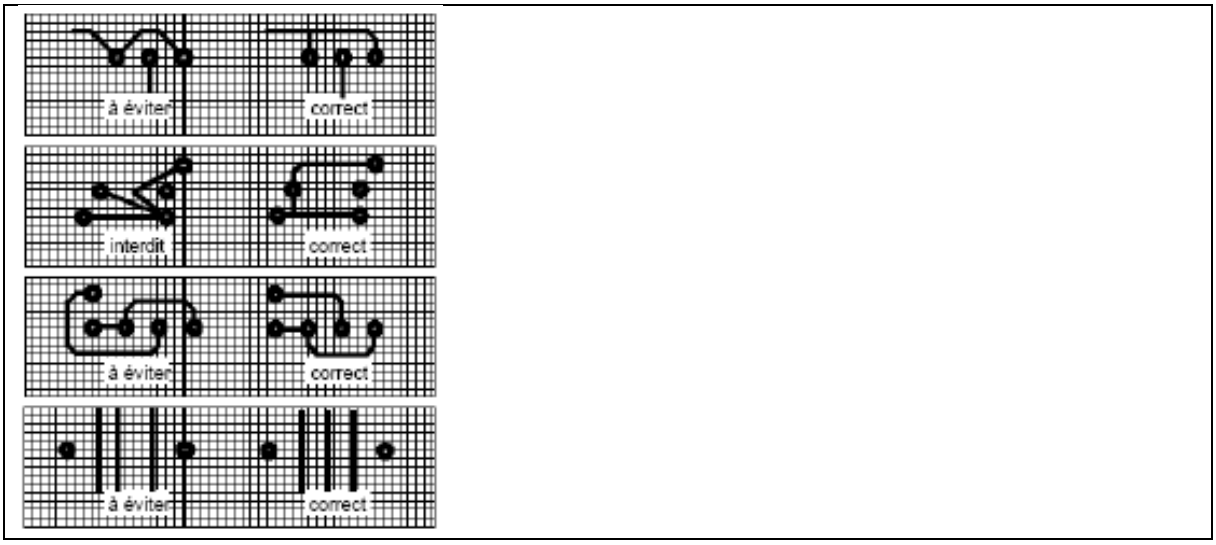
### 2.6.2 Mise en place des pistes

Les figures suivantes résument les passages des pistes à travers le circuit. Plusieurs situation sont déconseillée ou à éviter.

Remarque :

D'autre possibilité peuvent être envisagé ces figures présente es principales situation quand on peut avoir




à éviter
correct
interdit
correct
à éviter
correct
à éviter
correct

# Chapitre II

# SOFTWAIRE POUR LE DEVELOPPEMENT DE CIRCUIT IMPRIMÉ

# 1 Introduction sur les logiciels de CAO électronique

Il existe de nombreux logiciels pour concevoir des circuits imprimés, gratuitement ou non, depuis la phase de prototypage jusqu'à l'industrialisation. Comment choisir entre un logiciel gratuit pour les amateurs de bricolage et des suites logicielles complexes coûtant assez chères. Citons parmi elle :

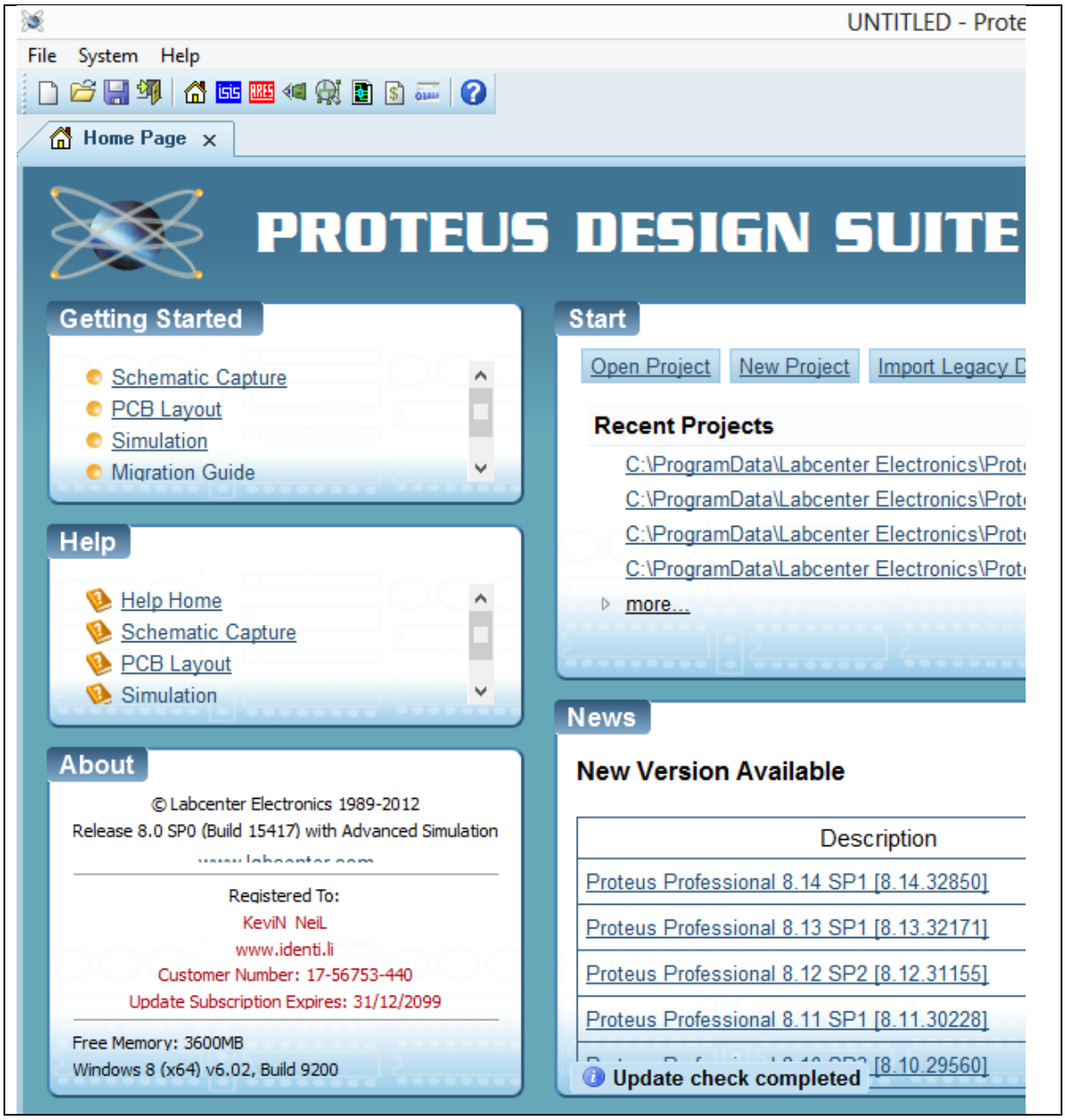
- Proteus.
- Eagle.
- Altium.
- Ki CAD.
- Cadence OrCAD PCB Designer.
- Design Spark.
- Cadstar.

2. Le Logiciel de CAO PROTEUS:

## 1.1 Présentation

Proteus est une application unique avec de nombreux modules de service offrant différentes fonctionnalités (capture schématique, implantation de PCB, etc.). Le wrapper qui permet à tous les différents outils de communiquer entre eux se compose de trois parties principales.

C'est un framework qui héberge toutes les fonctionnalités de Proteus. ISIS, ARES, 3DV qui s'ouvrent tous sous forme de fenêtres à onglets. La base de données commune contient des informations sur les pièces utilisées dans le projet. Une pièce peut contenir à la fois un composant schématique et une empreinte PCB ainsi que des propriétés utilisateur et système. L'accès partagé à cette base de données par tous les modules de l'application permet un grand nombre de nouvelles fonctionnalités, dont beaucoup évolueront au cours du cycle de vie de la version 8. Comme le montre la figure suivante :




## 1.2 Avantage

### 1.2.1 Live NETlist

Avec la base de données commune, la maintenance d'une netlist en direct permet à tous les modules ouverts de refléter automatiquement les modifications. L'exemple le plus évident de ceci est le câblage dans ISIS produisant des connexions ratsnest dans ARES, mais cela va beaucoup plus loin que cela. Le nouveau module Bill of Materials contient une visionneuse en direct et la visionneuse 3D et l'explorateur de conception sont également liés à la netlist en direct.

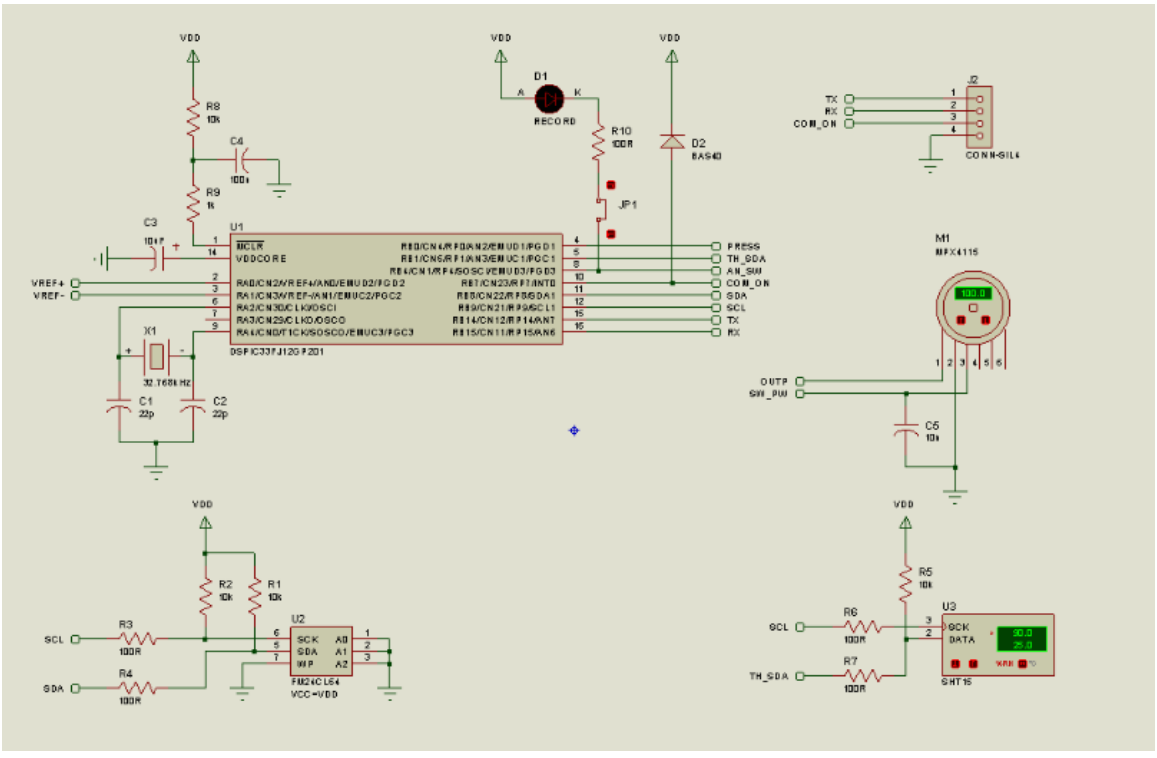
Ce document couvre le cadre d'application Proteus 8 et d'autres fonctionnalités liées à la suite logicielle dans son ensemble. Les différents modules d'application (par exemple ISIS, ARES) ont chacun leurs propres manuels de référence et documentation didactique.

### 1.2.2 Environnement developper pour la schématique

La base de la conception schématique consiste à choisir des composants dans les bibliothèques, les placer sur le schéma et les câbler ensemble.

La conception en question est relativement grande et il y a donc une quantité raisonnable de dessin impliqué. La première chose que nous devons faire est d'obtenir les pièces des bibliothèques dont nous avons besoin dans notre schéma.

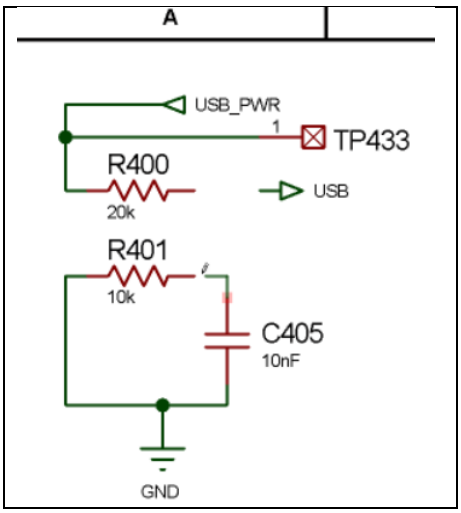
Après avoir sélectionné les pièces dont nous avons besoin, la prochaine étape consiste à les placer sur la zone de dessin - la fenêtre d'édition - et à les relier ensemble. Vous remarquerez sur la capture d'écran suivante  que le contenu du schéma est organisé en blocs logiques de . Ceci est en partie esthétique mais réduit également l'encombrement du câblage sur le schéma et nous permettra de couvrir l'utilisation des bornes pour former des connexions au fur et à mesure que nous progressons dans le didacticiel.



## 1.3 La Schématique

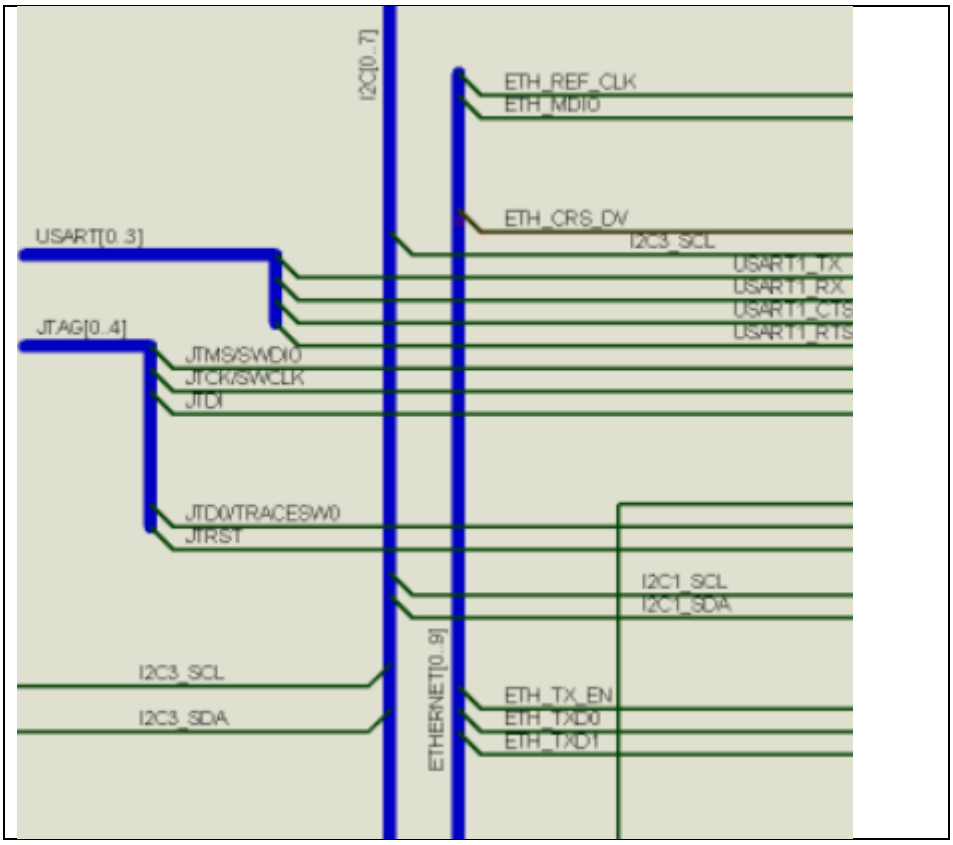
### 1.3.1 Connexion et câblage

Placer un fil peut être aussi simple que de cliquer sur les deux broches que vous souhaitez connecter - le Wire Auto-Router fait le reste. Mais si vous voulez un fil à un endroit particulier, vous pouvez simplement cliquer sur les coins intermédiaires. Le Wire Auto-Router fonctionne également lorsque les composants sont déplacés, réparant automatiquement le câblage affecté.



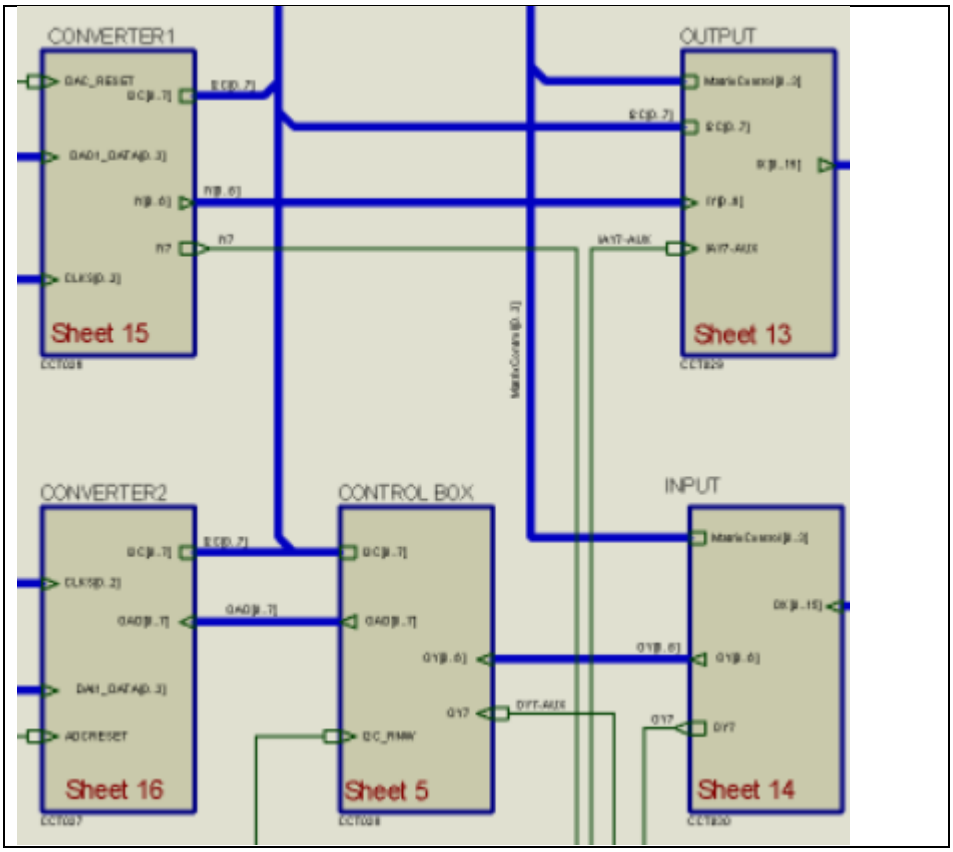

### 1.3.2 Les Bus

Proteus prend en charge les fils de bus, les bornes, les ports de module et les broches de périphérique. Cela le rend idéal pour gérer des conceptions de microprocesseurs complexes dans lesquelles certains appareils peuvent avoir plus de 400 broches physiques. L'édition fastidieuse est évitée en dessinant chacun des bus d'adresse et de données comme une seule broche. Les bornes de bus et les ports de module permettent de spécifier rapidement les interconnexions de bus entre les feuilles et les niveaux hiérarchiques.



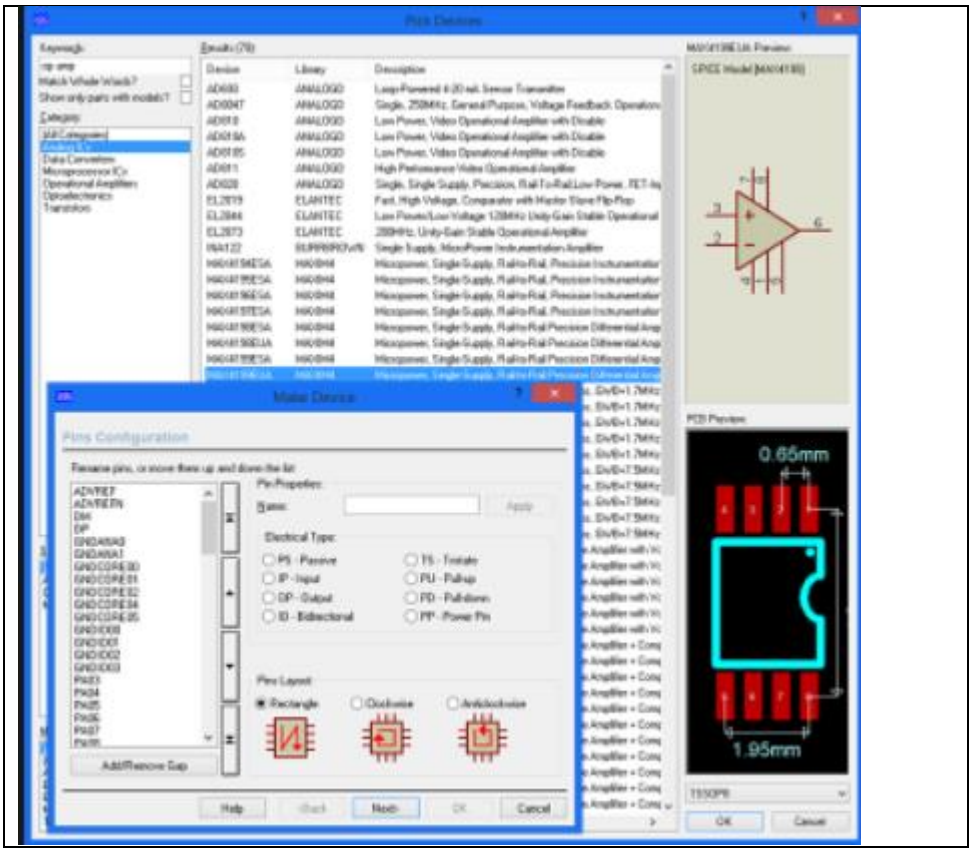

### 1.3.3 Conception hiérarchique

En plus de prendre en charge les conceptions multi-feuilles normales (équivalentes à un circuit réparti sur plusieurs morceaux de papier), Proteus capture prend entièrement en charge la hiérarchie au sein d'une conception. En d'autres termes, un composant particulier peut être défini comme un module qui est ensuite représenté par un autre schéma de circuit. La hiérarchie peut être imbriquée à un nombre arbitraire de niveaux et les modules peuvent être dessinés soit en tant que composants standard, soit en tant que blocs de sous-circuit spéciaux sur lesquels les ports d'interface peuvent être placés et supprimés à la volée.



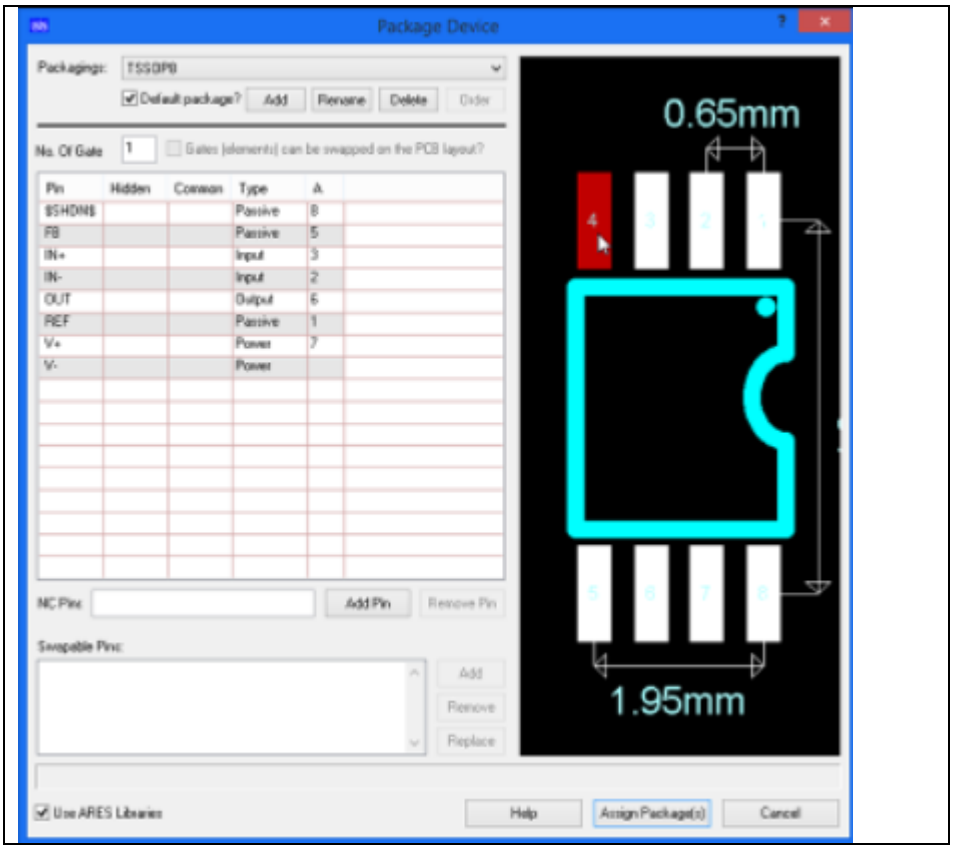

### 1.3.4 Device Libraries

Proteus capture comes with pre-supplied libraries for TTL, CMOS, ECL, Microprocessor, Memory and Analogue ICs plus libraries with hundreds of named Bipolar, FET and Diode discrete semiconductors. Also included are manufacturer specific libraries from National Semiconductor, Philips, Motorola, Teccor, Texas Instruments, Dallas and Zetex amongst others - an expanding total, currently well over 35,000 parts. Additional parts can easily be created on the schematic while BSDL import provides a semi-automatic route for creating complex ICs.




### 1.3.5 Packaging Tool

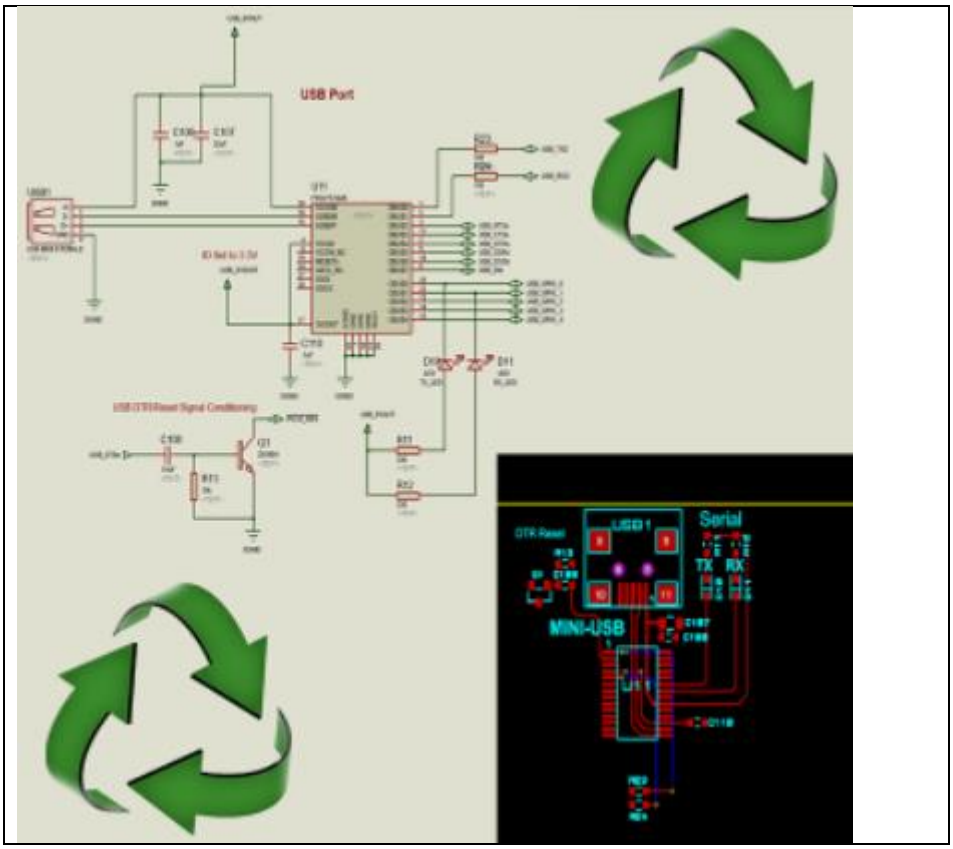
L'association de pièces de schémas et de bibliothèques de circuits imprimés est grandement simplifiée par l'outil d'empaquetage. Cet outil fournit un environnement graphique dans lequel attribuer une ou plusieurs empreintes de PCB à une pièce schématique. Pour chaque boîtier de circuit imprimé, un tableau mappant les numéros de broches aux noms de broches est créé de sorte que différents emballages peuvent avoir différents numéros de broches pour la même broche schématique. L'outil de conditionnement facilite également la saisie de différents numéros de broches pour chaque élément dans une pièce multi-éléments. , et chaque bit d'une broche de bus.




### 1.3.6 Clips de projet / extraits de conception

Les clips ou extraits de projet offrent un moyen formel de réutiliser des parties d'un projet existant dans des travaux futurs. L'idée de base est simple; sélectionnez une zone de schéma et/ou une zone de mise en page, puis exportez-les sur le disque pour les importer dans un futur projet.

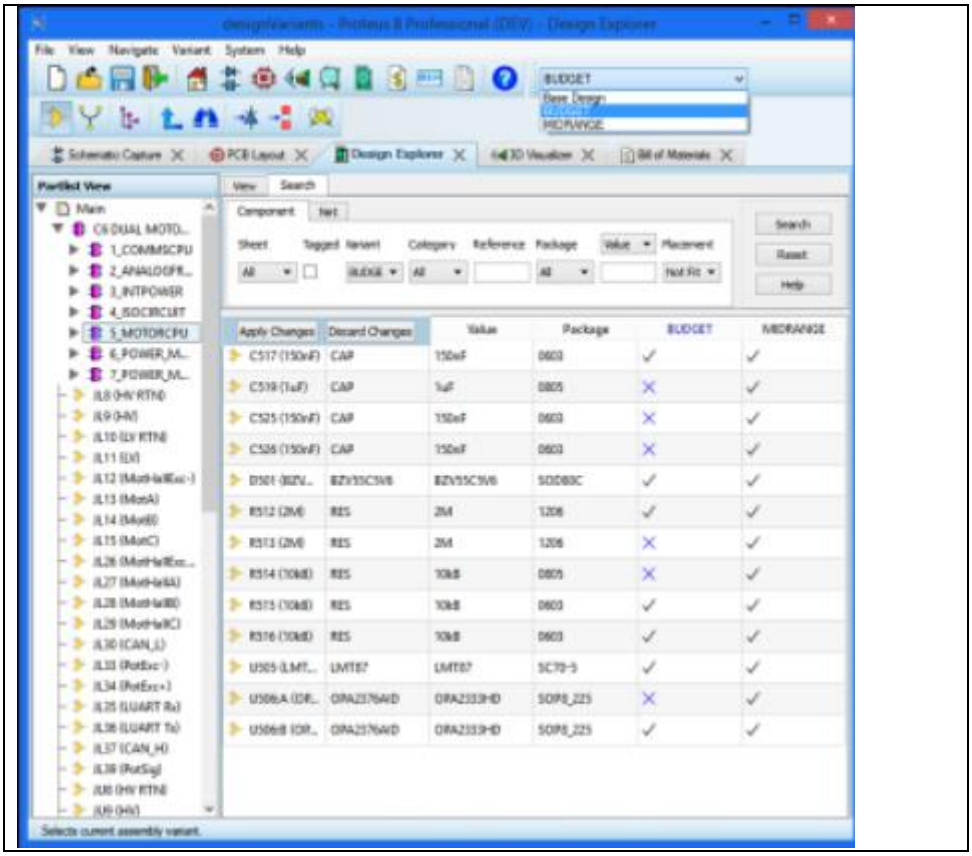
Vous pouvez créer des clips de projet schématiques uniquement ou, plus communément, le clip de projet contiendra à la fois la conception schématique et la disposition de circuit imprimé correspondante. Lorsque vous placez le clip de projet dans un projet différent et que vous placez le schéma, le clip de circuit imprimé associé sera prêt à être placé en tant qu'unité unique avec l'annotation correcte. Au fil du temps, vous pouvez créer votre propre bibliothèque de pièces utiles qui peuvent ensuite être réutilisées dans des travaux futurs.




### 1.3.7 Variantes de montage

Les variantes d'assemblage offrent une méthode simple de gestion de plusieurs configurations de produit dans un seul projet de schéma/circuit imprimé. Cela se fait en spécifiant le statut monté ou non monté de chaque composant sur une base par variante.

Dans Proteus, l'interface utilisateur est gérée par l'explorateur de conception qui a une colonne pour chaque variante, permettant à l'utilisateur d'ajouter/supprimer facilement des composants de cette variante de produit. Le logiciel gère ensuite ces informations via tous les systèmes de sortie, en modifiant le rapport de nomenclature, les fichiers Pick and Place, les dessins d'assemblage, la visionneuse 3D et toute exportation pour MCAD.

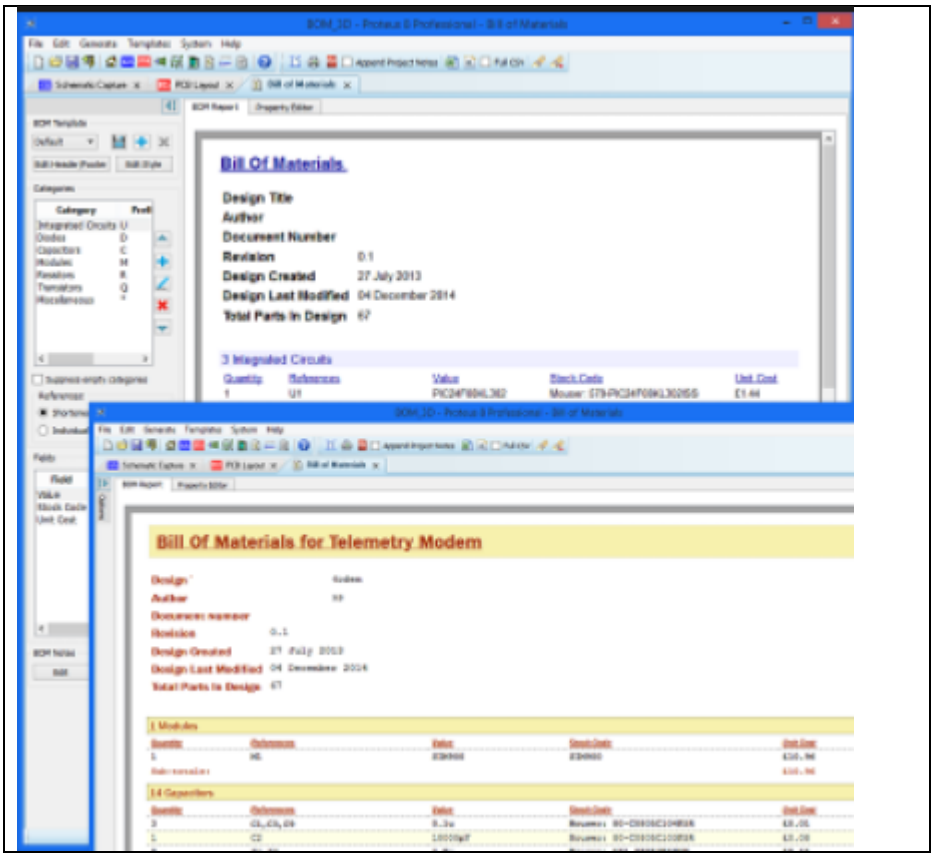


### 1.3.8 Bill of Materials

La nomenclature dans Proteus 8 fonctionne dans sa propre fenêtre d'application avec une vue WYSIWYG du rapport. Les modifications apportées au schéma et/ou au formatage sont reflétées immédiatement et un éditeur d'en-tête/pied de page intégré est également fourni.

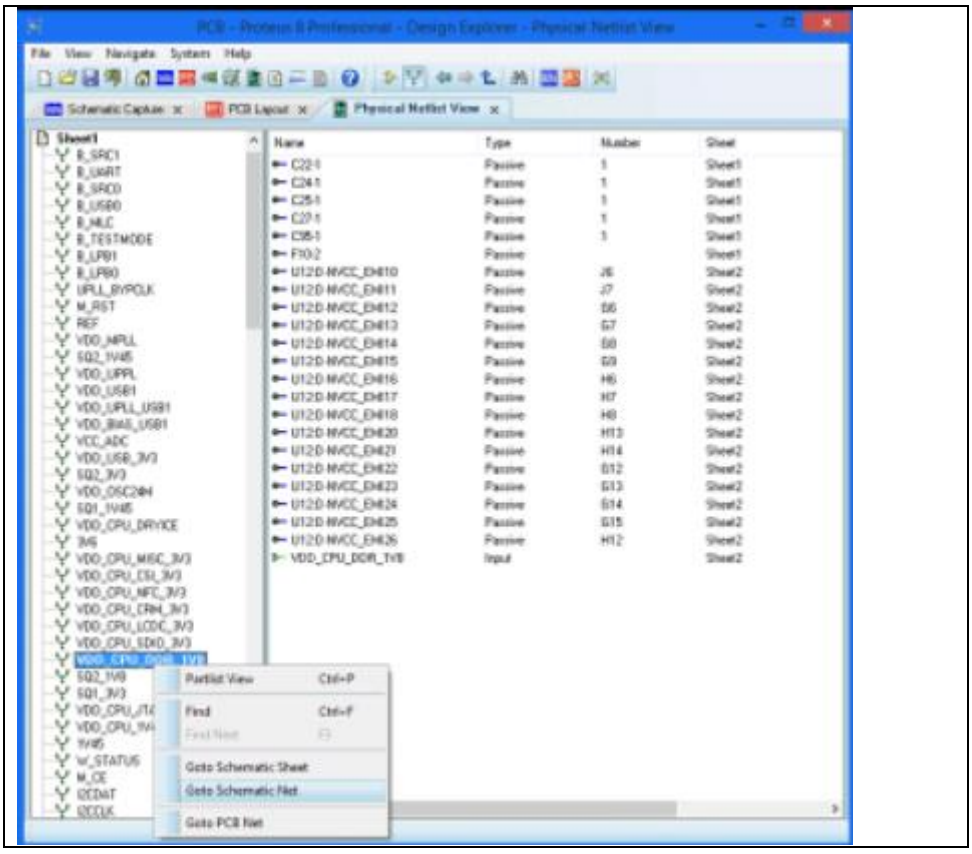
De plus, les propriétés des composants peuvent être ajoutées/supprimées ou modifiées à partir de la fenêtre de nomenclature. Toute modification est automatiquement rétro-annotée sur le schéma. C'est, bien sûr, l'endroit le plus naturel pour ajouter les codes de stock/commande, les coûts des composants, etc.

La sortie finale peut être imprimée, Excel ou PDF comme vous le souhaitez.




### 1.3.9 Design Explorer

L'explorateur de conception est un outil unique dans Proteus qui fournit une interface utilisateur de style Windows pour vous permettre à la fois de naviguer et d'inspecter votre schéma à n'importe quelle étape du processus de conception. Il inclut la capacité non seulement d'interroger l'état actuel du schéma pour vérifier la connectivité, les emballages, etc., mais également de naviguer vers des éléments d'intérêt à la fois sur le schéma et sur le PCB (sondage croisé vers une empreinte de PCB ou un réseau dans la mise en page emballer).




## 1.4 Conceptions multi-feuilles et connectivité

Il est de plus en plus courant dans les grandes conceptions de diviser le schéma en plusieurs feuilles. Cela sert à la fois à réduire l'encombrement du schéma et à organiser la conception en blocs logiques. ISIS soutient pleinement cette méthodologie et nous avons organisé notre conception de didacticiel en deux feuilles afin de couvrir les procédures pertinentes. Le travail que nous avons fait jusqu'à présent a consisté à terminer la première feuille (processeur, capteurs et circuits de mémoire), ce qui signifie que nous devons encore couvrir les circuits analogiques et de puissance. Nous le ferons sur une feuille séparée.

# 2 Le PCB

Idéalement, chaque composant dans ISIS devrait être associé à une empreinte dans l'éditeur de PCB (ARES). Bien que vous puissiez le faire au moment du placement dans ARES, la meilleure pratique serait de régler cela dans le schéma. Heureusement, le système Proteus fournit un large ensemble de composants pré-emballés où tout ce travail est fait pour nous. À titre d'exemple, le schéma que nous venons de créer ne nécessite aucun travail de modification ou d'emballage car les pièces que nous avons sélectionnées dans les bibliothèques ont déjà des empreintes qui leur sont attribuées.

Cependant, il est possible que vous souhaitiez modifier l'empreinte associée à une pièce (par exemple, PTH à SMT). Nous utiliserons le schéma actuel comme terrain de jeu pour explorer comment nous pouvons afficher et modifier les packages en composants. L'encombrement d'un composant est simplement une propriété du composant dans ISIS. On peut donc facilement visualiser l'empreinte en éditant le composant.

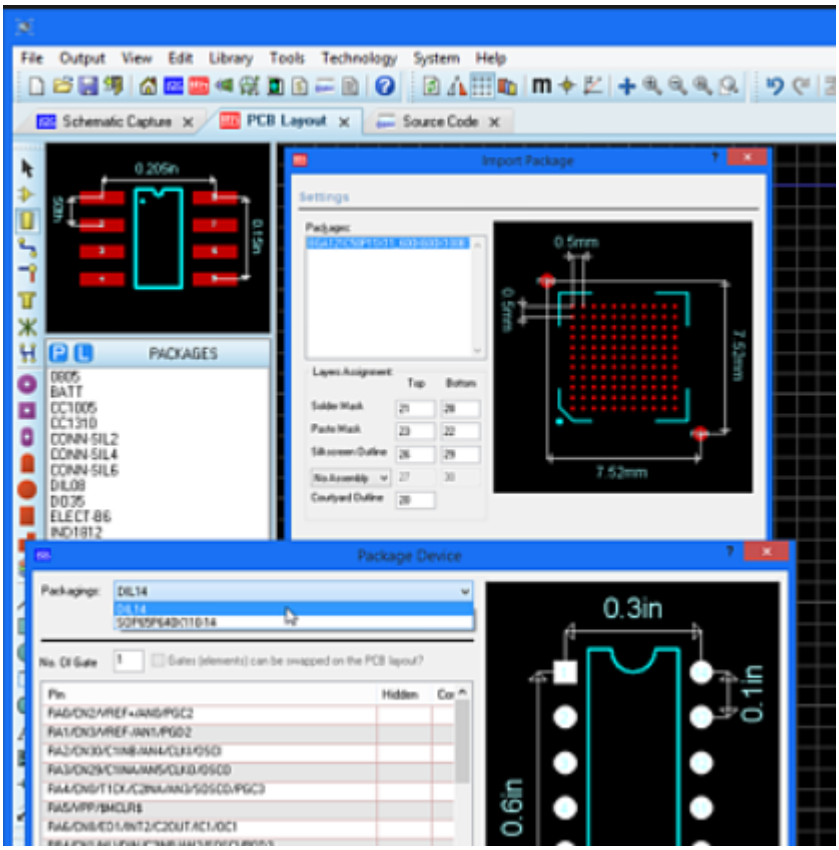
Tous les produits Proteus PCB incluent un riche ensemble de fonctionnalités de base, avec des fonctionnalités plus avancées ajoutées dans les niveaux de produit supérieurs (PCB niveau 2 et supérieur). Ceux-ci sont abordés plus en détail dans les rubriques ci-dessous.

La capacité de conception évolue également avec la gamme de produits, d'une limite de 500 broches dans le kit de démarrage de conception de circuits imprimés à une capacité de conception illimitée dans les produits PCB Design Level 3 et Platinum.

## 2.1 Footprint Libraries

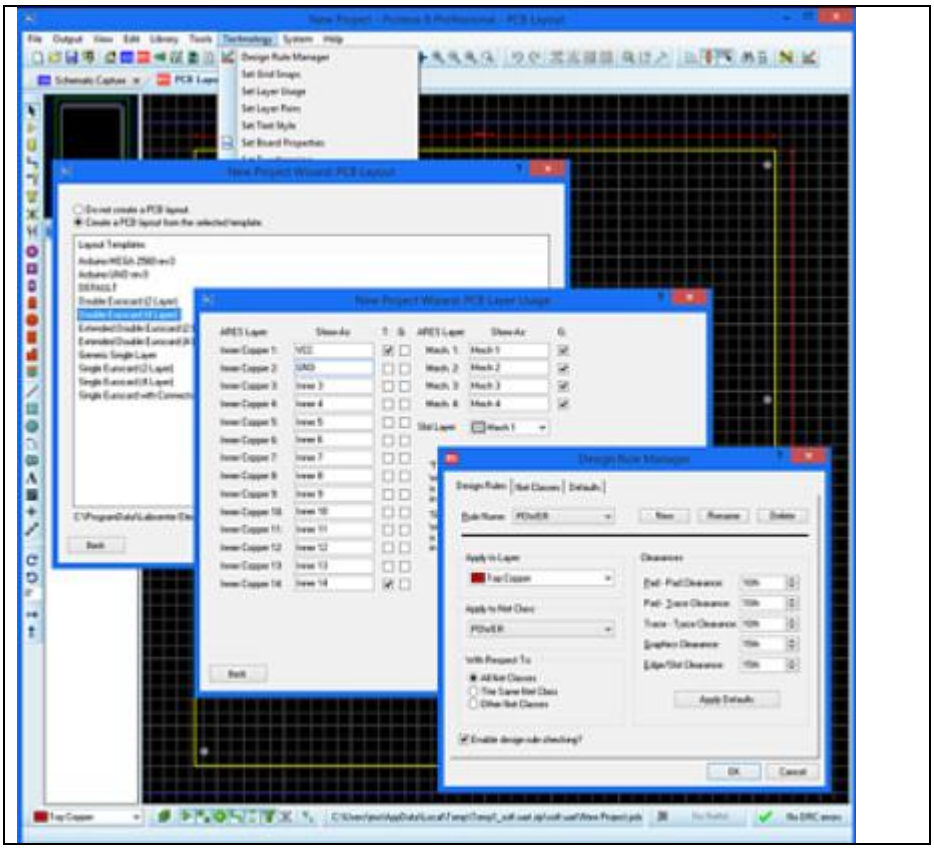
Les bibliothèques fournies couvrent une large gamme de composants traversants, y compris tous les types de boîtiers de circuits intégrés, de transistors, de diodes et de connecteurs les plus courants. Nous fournissons également en standard les bibliothèques IEC complètes et les empreintes SMT qui incluent tous les styles de conditionnement discrets et IC standard. Les bibliothèques standard de montage en surface standard IPC-782 et IPC-7351 sont incluses.

Si nécessaire, de nouveaux packages peuvent facilement être créés directement sur le dessin et les fonctionnalités générales de dessin 2D sont également prises en charge. Un outil d'importation directe pour le format PADS ASCII Layout permet d'importer des empreintes à partir d'outils populaires tels que PCB Library Expert et Ultra-Librarian




## 2.2 Modèles et données techniques

Le module de mise en page Proteus comprend un schéma complet de réutilisation de la conception sous la forme de modèles de cartes et de données technologiques. Un utilisateur peut créer plusieurs modèles représentant des projets communs, puis initialiser de nouvelles mises en page à partir du modèle pour précharger toutes les informations configurées. Un ensemble par défaut de cartes Eurocard communes est fourni en standard. Un fichier modèle est essentiellement une disposition de base (bord de carte, trous de montage, etc.) ainsi qu'un ensemble de données technologiques. Ces données incluent les règles de conception, les classes de réseau, les informations d'empilement des couches, les grilles, les unités et les propriétés de la carte et peuvent être appliquées directement à d'autres mises en page ainsi qu'à l'initialisation d'un nouveau projet à partir du modèle.



## 2.3 Routage manuel

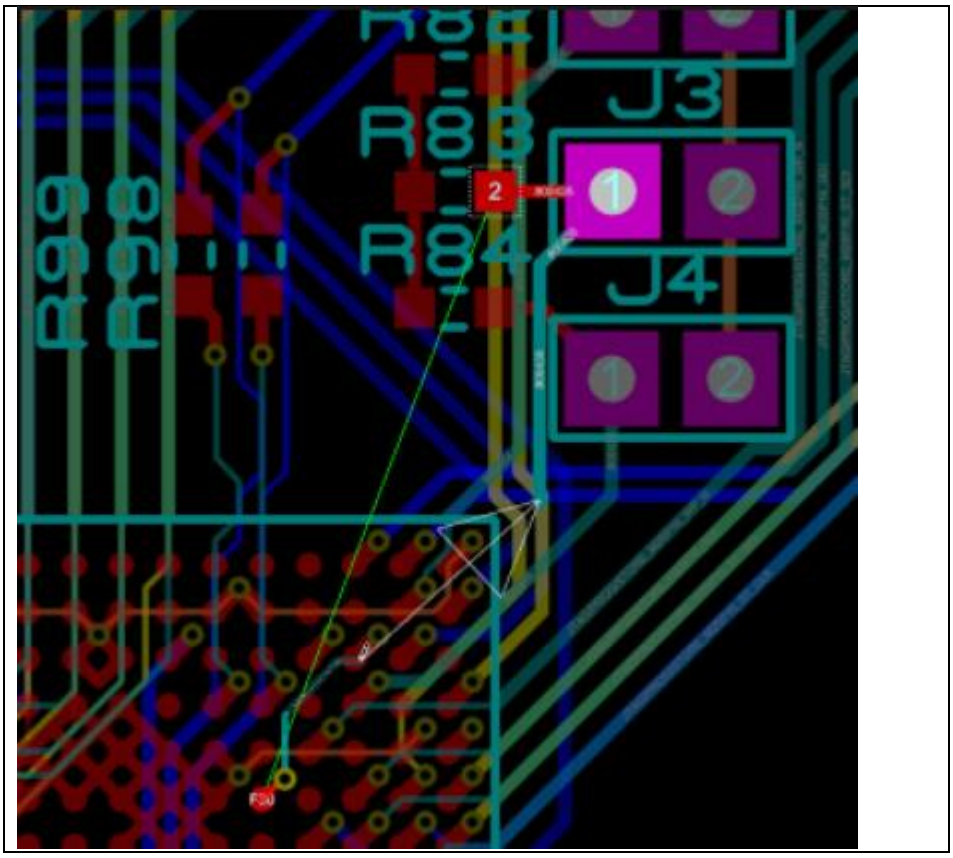
Le routage manuel n'exige pas que vous commenciez à partir des lignes de ratsnest (rubberbanding). Vous pouvez placer le suivi comme vous le souhaitez et Proteus supprimera les lignes de ratsnest lorsque les connexions sont réellement terminées.

Lors du placement de la piste, l'itinéraire suivra la souris dans la mesure du possible et contournera intelligemment les obstacles tout en respectant les règles de conception du projet.

Lors de la modification d'itinéraires, vous pouvez rediriger ou supprimer n'importe quelle section d'une piste, quelle que soit la manière dont elle a été placée à l'origine. Des commandes sont également fournies pour modifier l'épaisseur et/ou la couche de n'importe quelle section de suivi.

Si des pistes épaisses sont posées entre des obstacles tels que des pads IC, la route sera automatiquement « étranglée » afin de maintenir les règles de conception actuelles.

Les voies courbes peuvent être tracées simplement en appuyant sur la touche CTRL et en marquant l'itinéraire avec la souris.

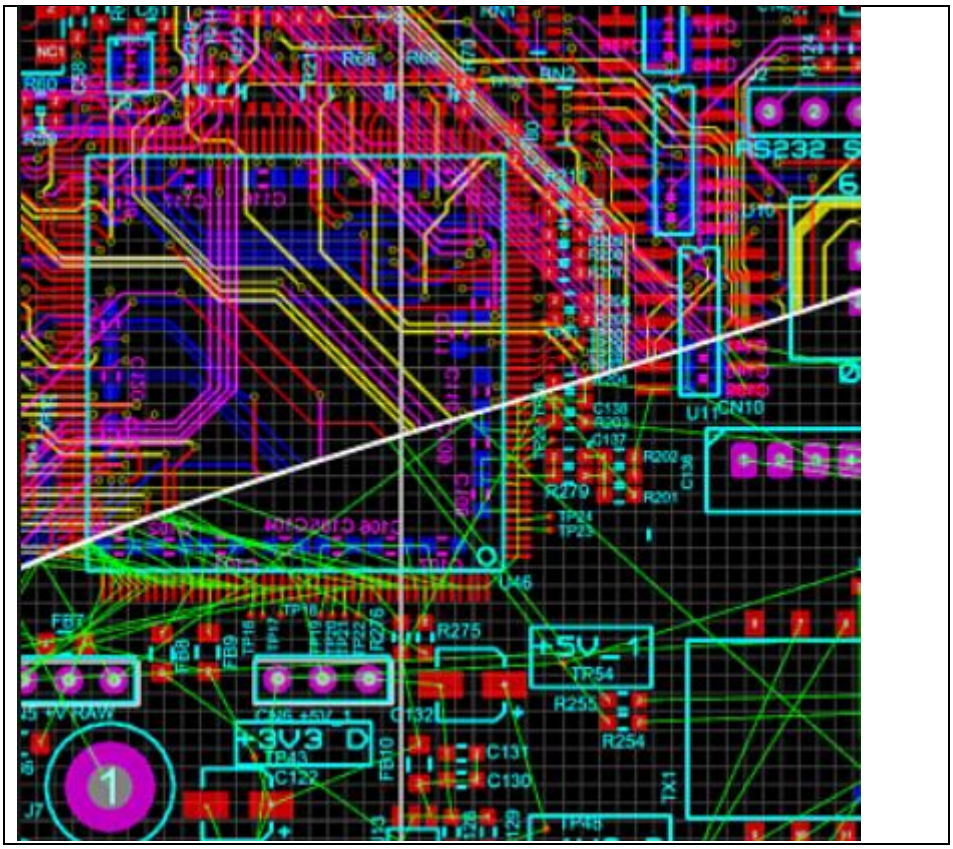



## 2.4 Length Matching

L'adaptation de la longueur des pistes est une étape essentielle pour garantir une synchronisation correcte au niveau du récepteur de signal pour les transmissions à grande vitesse. Proteus inclut la prise en charge de la correspondance automatique de la longueur des pistes via une interface utilisateur simple de sélection et de correspondance. Cela inclut la possibilité d'avoir des segments de piste dans plusieurs groupes de correspondance, ce qui est nécessaire pour les topologies de routage telles que la configuration de survol DDR3.

Une grande partie de la difficulté avec la correspondance de longueur réside dans la disposition de la trace supplémentaire utilisée pour allonger les itinéraires les plus courts (souvent appelés la serpentine). En fonction du temps de montée du signal, de la fréquence du signal, de l'exigence de sites via sur le PCB et de nombreux autres facteurs, le concepteur de PCB peut avoir besoin d'ajuster ou de limiter la hauteur et la largeur de la serpentine. Dans Proteus, tout cela est géré via un formulaire de dialogue unique où la topologie de la serpentine peut être contrôlée. Vous pouvez également ajuster une tolérance absolue ou relative pour la correspondance de longueur en fonction du budget de synchronisation de votre interface.

Pour les grands BGA, la distance du signal interne peut être ajoutée au composant sous forme de fichier CSV et un rapport de correspondance de longueur peut être généré à tout moment.

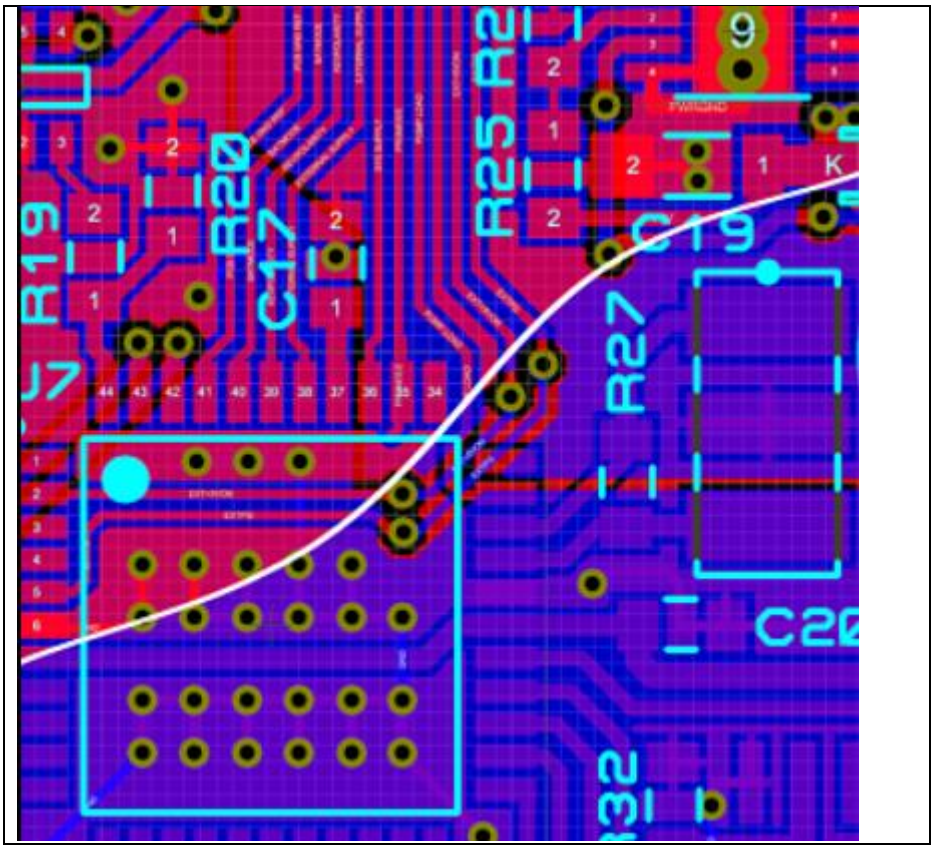



## 2.5 Plan de masse

Proteus propose le nec plus ultra en matière de prise en charge des plans de puissance - des régions polygonales pouvant être placées par l'utilisateur dans lesquelles des limites intérieures sont automatiquement créées autour des pads et du suivi existants. Changez les pads et le suivi et les limites sont recalculées pour maintenir les dégagements des règles de conception. Les reliefs thermiques sont pris en charge et vous pouvez choisir de hachurer ou de remplir chaque polygone. Des zones intérieures (zones imbriquées) peuvent être incluses et/ou des îlots de cuivre non connectés supprimés. Tous les calculs sont basés sur une géométrie de forme sans grille et se produisent en arrière-plan afin qu'il n'y ait aucune interférence dans le placement manuel de la carte pour les mises en page à calcul intensif.

Vous pouvez placer un remplissage d'inondation avec tous les packages de PCB, mais la possibilité de placer plusieurs plans d'alimentation par couche fait partie de l'ensemble de fonctionnalités avancées et nécessite Proteus PCB Design Level 2 ou supérieur

.

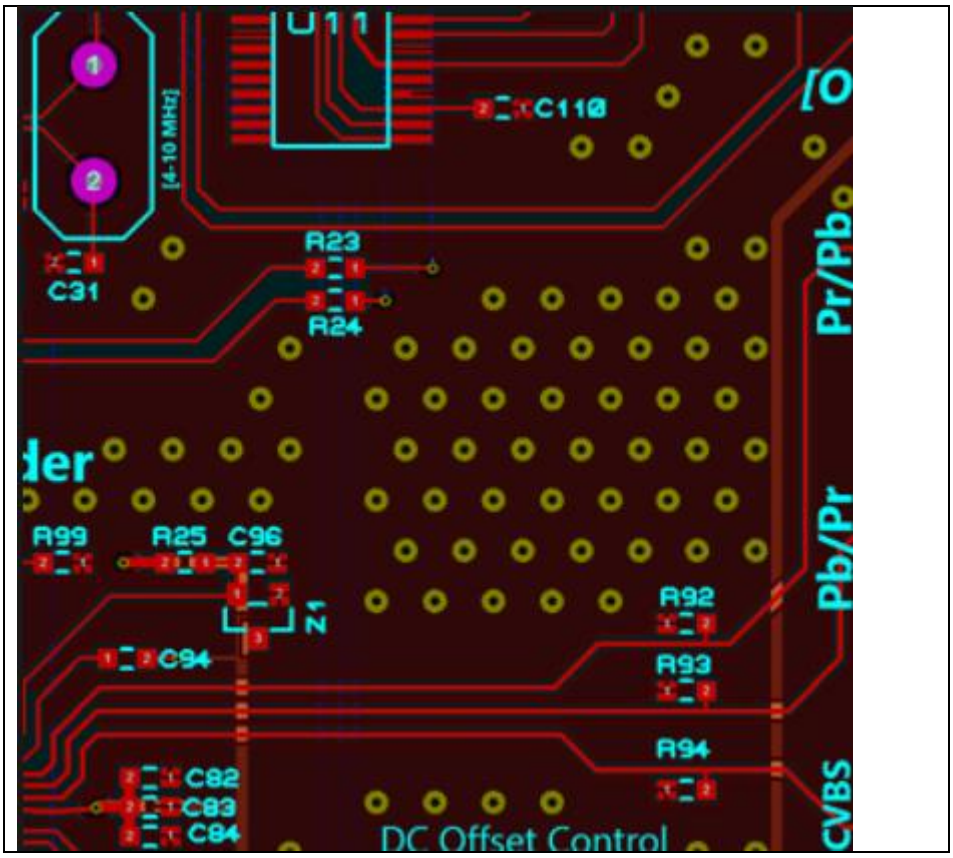



## 2.6 Stitching and Shielding

La couture via est une technique utilisée pour relier de plus grandes zones de cuivre sur différentes couches, aidant à garder les chemins de retour courts et à réduire le bruit sur le PCB. Vous pouvez assembler automatiquement des plans dans Proteus via une simple commande de menu contextuel. Cela vous permet de contrôler le style, ainsi que l'espacement et les décalages de rangées pour le motif de couture.

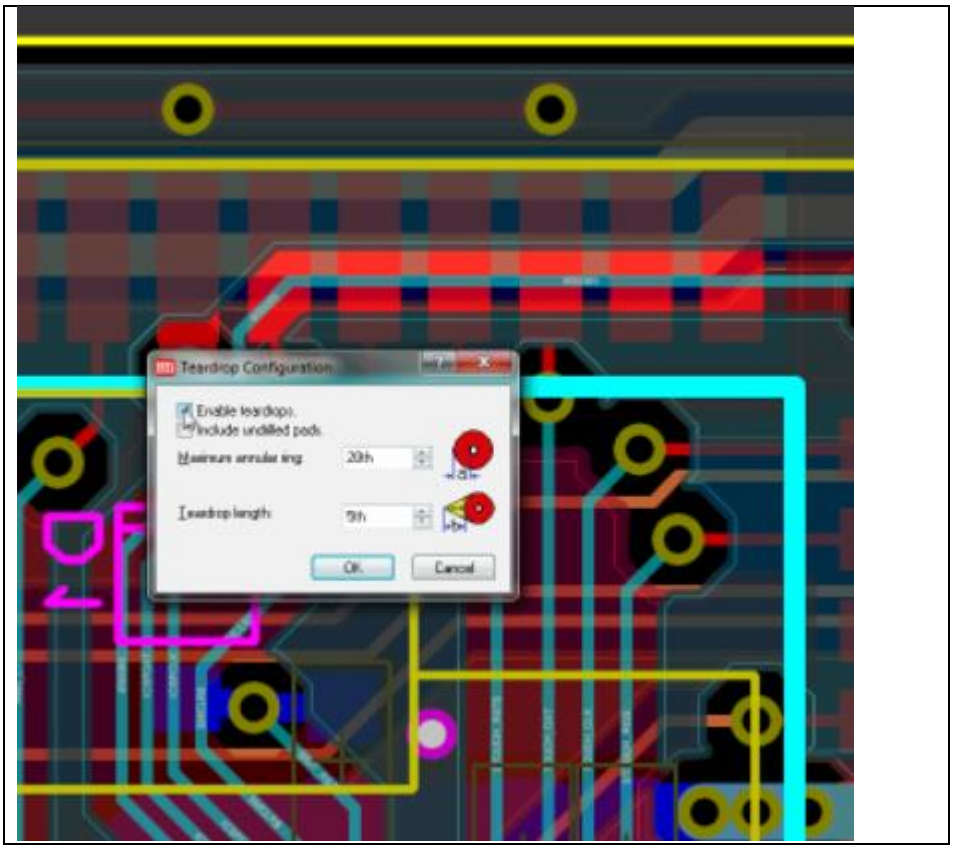
Un bouclier via ou une palissade peut être ajouté autour de la bordure des avions de la même manière. Cela créera une seule rangée de vias autour du périmètre des zones et peut aider à prévenir les interférences électromagnétiques avec d'autres équipements.

La même technique peut être utilisée avec des routes à grande vitesse telles que microstrip ou stripline pour aider à isoler les signaux sur le PCB fonctionnant à différentes fréquences.




## 2.7 Teardrops

Les larmes sont souvent utilisées au point de connexion entre la piste et le patin pour empêcher l'éclatement du forage lors de la fabrication de la planche. Proteus PCB Design inclut une prise en charge complète des larmes. Lorsqu'elles sont activées, des connexions en goutte d'eau seront établies pour tous les itinéraires de qualification. Ils sont ensuite automatiquement générés, mis à jour et supprimés lorsque vous placez, modifiez et supprimez des itinéraires lors de la disposition du tableau.

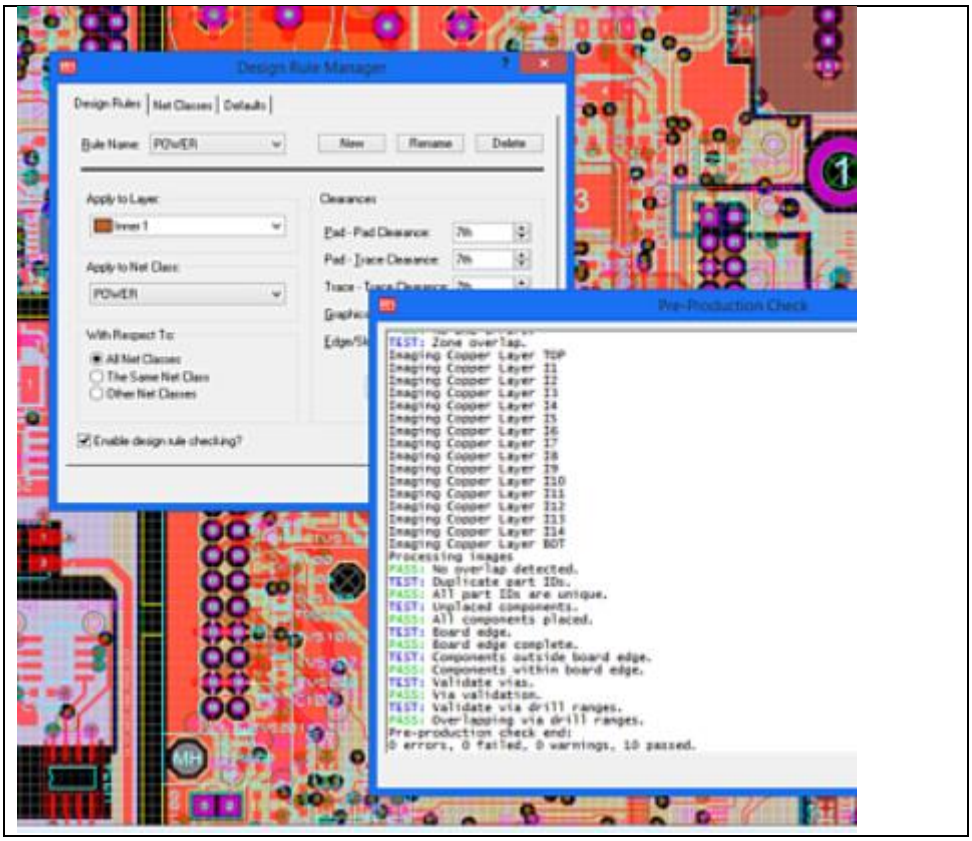



## 2.8 Vérification

Pendant le routage manuel, Proteus vérifie chaque piste au fur et à mesure que vous la placez et vous avertit si des règles de conception (physiques/électriques) sont enfreintes. Vous pouvez entièrement personnaliser les contraintes du tableau, définir des règles par couche et/ou par stratégie ou même créer des règles régissant le comportement entre les stratégies du tableau.

Une indication en direct de la connectivité et de l'état des règles de conception de la carte est fournie dans la barre d'état en bas de Proteus. Cliquer sur l'un ou l'autre produit un rapport répertoriant toutes les connexions manquantes ou supplémentaires - double-cliquez sur n'importe quelle entrée de la liste, et le logiciel effectuera un zoom avant pour vous montrer exactement où se trouve l'erreur sur le PCB.

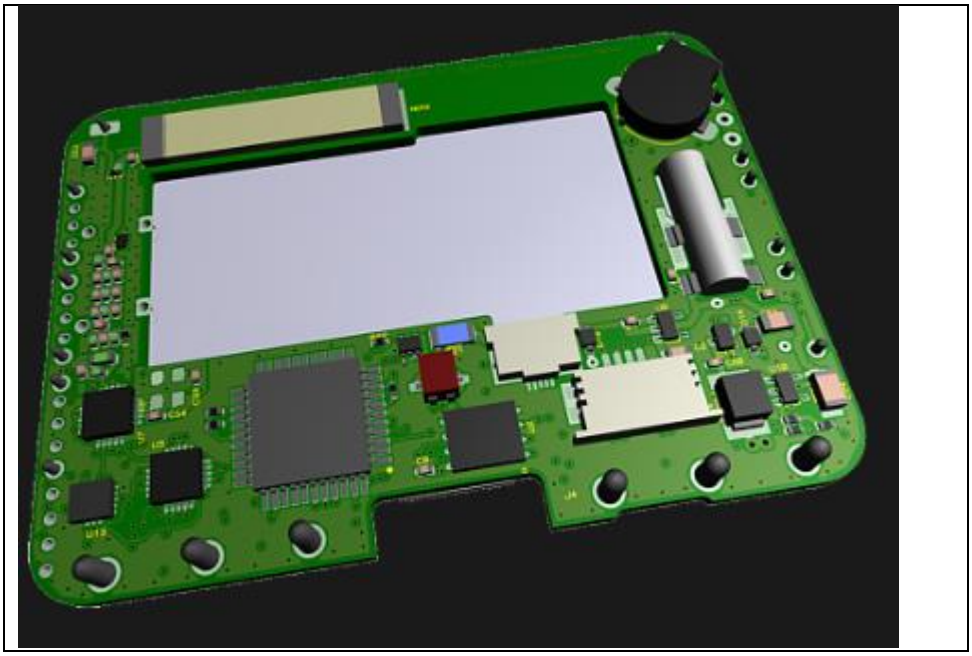
Enfin, le contrôle de préproduction s'exécute avant la sortie de fabrication et est conçu pour être un contrôle d'assurance qualité automatisé. En plus de tester les règles de connectivité et de conception, il teste la géométrie et l'intégrité du plan d'alimentation via un chemin de code complètement séparé et exécute des tests séparés pour les erreurs de conception courantes.




## 2.9 Visualisation 3D

L'outil de visualisation 3D (visionneuse 3D) de Proteus permet d'extruder une mise en page et de visualiser la carte telle qu'elle apparaîtrait dans la vie réelle. Ceci est extrêmement utile comme aide à la conception lors de la mise en page de la carte. La navigation, à la fois orbitale et "volante", est extrêmement intuitive et contrôlée par la souris. L'utilisateur peut également spécifier un "plan de hauteur" correspondant au châssis de la carte qui apparaîtra sous la forme d'une boîte semi-transparente autour de la carte, permettant un contrôle visuel rapide des saillies.

Les bibliothèques Proteus sont fournies avec des empreintes 3D et une prise en charge complète pour la création d'empreintes 3D personnalisées directement dans Proteus ou en important des modèles via les formats de fichier standard STEP/IGES et 3DS. Les fichiers peuvent être exportés dans ces formats à partir de la majorité des packages MCAD commerciaux et il existe un grand nombre de ressources Internet gratuites (par exemple 3d content central) qui disposent de vastes bibliothèques de fichiers STEP.



## 2.10 Output Formats

En plus de prendre en charge la capacité de base de produire votre PCB sur des imprimantes Windows standard, Proteus fournit un ensemble complet de fonctionnalités pour la fabrication de cartes professionnelles.

Gerber X2 est le principal format de sortie de fabrication pris en charge. Ce format, associé à une netlist IPC-D-356 et à des schémas d'assemblage facultatifs, fournit une représentation intelligente et complète du PCB à votre fabricant. La sortie traditionnelle Gerber/Excellon via le format RS274X est également prise en charge.

ODB++ est le format de sortie de fabrication secondaire pris en charge. Comme Gerber X2, ODB++ est également un format d'échange de données CAO/FAO intelligent, capturant toutes les connaissances de CAO/EDA, d'assemblage et de fabrication de PCB dans une seule base de données unifiée.

Enfin, vous pouvez exporter vers un logiciel MCAD tel que SolidWorks directement via les formats de fichier STEP, IGES ou IDF.

Les formats de sortie de CAO mécanique tels que STEP, IGES, STL et IDF ainsi que le format de fabrication avancé ODB++ font partie de l'ensemble de fonctionnalités avancées et sont limités au niveau 2 de conception de circuits imprimés Proteus et supérieur

IGES
RS274X
Gerber
ODB++
gbr
X2
STEP
ISO 10303
DXF
IDF
IPC-D-356A

# Chapitre III

# REALISATION D'UN CIRCUIT IMPRIME PAR LA TECHNIQUE CHIMIQUE

# 1 Gravure des circuit imprimé

## 1.1 Introduction

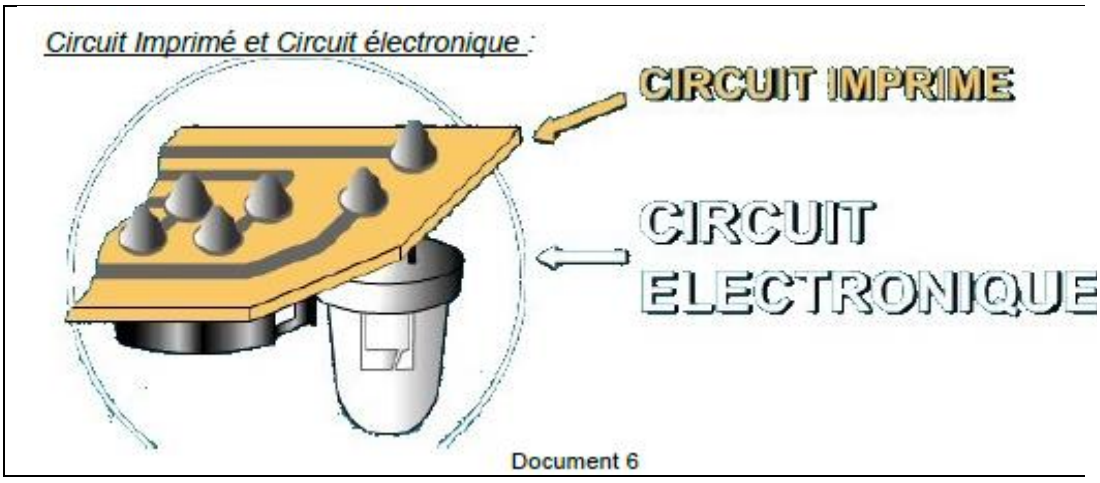
Il existe quatre procédés pour fabriquer un circuit imprimé à savoir :

- La gravure chimique.
- La gravure par rayons ultraviolets.
- La gravure mécanique.
- La gravure laser.

La gravure chimique demande du temps et nécessite des mesures strictes de sécurité.

Par ailleurs, il vous faut disposer de certains matériaux spécifiques tels que le Réactif d'attaque. La gravure chimique est une technique qui convient bien à la Conception de cartes électroniques simples ou pas trop complexes. Elle n'est par contre pas conseillée pour la conception de circuit imprimé avec connexions rapprochées et très fines.

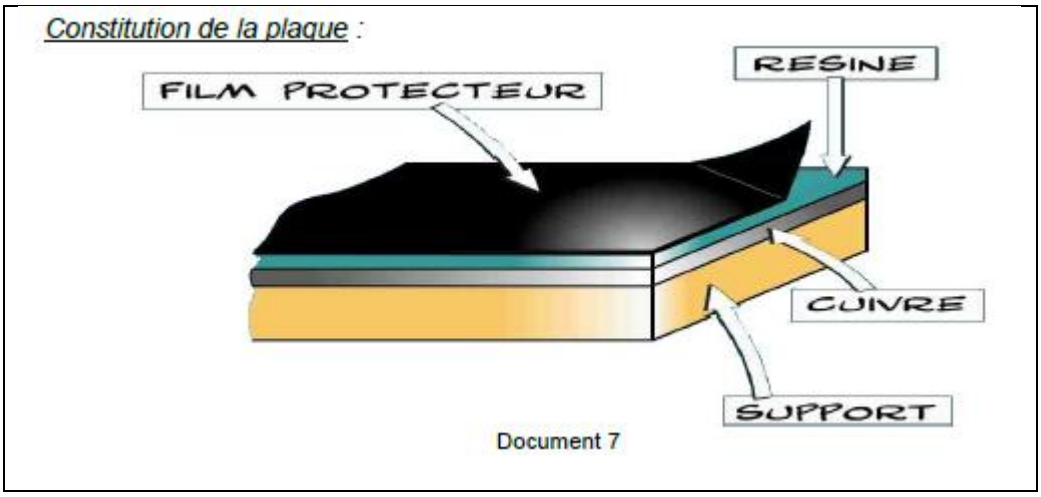
Le support des cartes électroniques est un circuit imprimé. Celui-ci est une plaque en époxy à la surface de laquelle des pistes en cuivre sont gravées. Il s'agit d'un support (généralement semi rigide mais parfois souple) constitué d'un matériau isolant (époxy, bakélite, FR4) permettant de réaliser 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 comme le montre la figure suivante :




Document 6

Toute la phase de préparation de la plaque a pour but d'enlever la résine puis une partie de la couche de cuivre pour que le cuivre restant forme les pistes que nous avons définies dans l'étape précédente.

Pour réaliser un circuit imprimé, on utilise un support isolant (résine époxy, bakélite, …) sur lequel semble collé des bandes de cuivre. Comme le montre la figure suivante :



Document 7

En pratique, une feuille de cuivre (épaisseur courante : 35 µm ou 70 µm) est collée sur la totalité de la surface du support. Les pistes sont dessinées en éliminant le cuivre superflu, soit par détourage à l'aide d'une fraise, soit par réaction chimique d'un « acide » (par exemple, le perchlorure de fer).

Remarque :

Il ne faut pas confondre « circuit imprimé » qui désigne la plaque et les pistes sur lesquelles seront soudés les composants et « circuit électronique » qui désigne l'ensemble de la carte électronique. Pour bien comprendre cette partie il est important de visualiser comment est constitué la plaque qui deviendra le circuit imprimé.

## 1.2 Gravure chimique d'un circuit imprimé

Cette méthode se base essentiellement sur 8 étapes :

### 1.2.1. Impression du typon

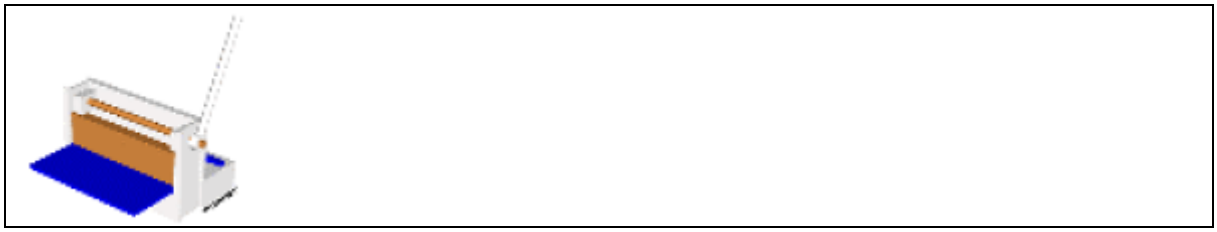
Lors du premier et deuxième chapitre on a vue comment développer ce typon on se basant sur des logiciel de CAO et respectons des nomes bien précises. Le typon pourra être dessiné à la main sur une feuille de papier calque, ou tracé sur ordinateur avec un logiciel spécialisé puis imprimé sur un transparent. L'avantage d'utiliser un typon est double : on pourra facilement fabriquer plusieurs circuits imprimés identiques « à la chaîne », et il est possible de réaliser des circuits imprimés complexes, possédant beaucoup de composants, et demandant une grande précision.

Remarque :

Pendant l'impression des typons il faut s'assurer que les distances entre les pistes et les différents composants sont respecter et identique au routage fournie par le logiciel de CAO.

### 1.2.2. Préparation de la carte époxy

Il faut découper, à l'aide d'une cisaille, la plaque Epoxy/cuivre aux dimensions du futur circuit imprimé.



L'une des cinq formes les plus courantes de matériaux d'isolation des PCB est utilisée.

**4.2.1 FR-2 :**

FR-2 est une option de substrat stratifié de qualité inférieure et ignifuge. C'est un matériau composite créé à partir de papier et de résine phénolique plastifiée, ce qui le rend à la fois léger et durable. Les circuits imprimés à simple face utilisent souvent ce matériau. Le FR-2 est sans halogène, non hydrophobe et peut être poinçonné ou fraisé facilement. L'un des choix d'isolation de PCB les moins chers, le FR-2 est un choix courant pour les entreprises produisant des produits électroniques grand public à usage unique.

**4.2.2 FR-4 :**

FR-4 est une option de substrat stratifié de haute qualité et ignifuge. C'est un matériau composite créé à partir de fibre de verre tissée, et il est souvent utilisé dans la fabrication de circuits imprimés double face et multicouches. Le FR-4 peut supporter des températures et une pression physique plus élevées que le FR-2. C'est également un matériau abordable, ce qui en fait un choix populaire pour les fabricants d'électronique grand public haut de gamme. Le FR-4 n'est pas traité mécaniquement aussi rapidement et nécessite des outils en carbure de tungstène pour être fraisés, poinçonnés ou usinés.

**4.2.3 RF :**

Les substrats RF sont conçus pour permettre aux PCB de fonctionner dans des applications qui utilisent des fréquences radio et des micro-ondes à haute puissance. Les substrats RF sont le plus souvent utilisés sur les PCB installés dans l'électronique militaire, l'électronique aéronautique et l'électronique aérospatiale. Cependant, il est important de noter qu'il existe quelques appareils électroniques grand public qui contiennent ce type de substrat. Les plastiques qui composent un substrat RF typique ne créent pas une énorme quantité

d'isolation, bien qu'ils fonctionnent bien lorsqu'ils sont chargés de générer de forts courants électriques. Les PCB RF et micro-ondes ont généralement très peu de couches, parfois seulement une ou deux.

### 4.2.4 FLEX

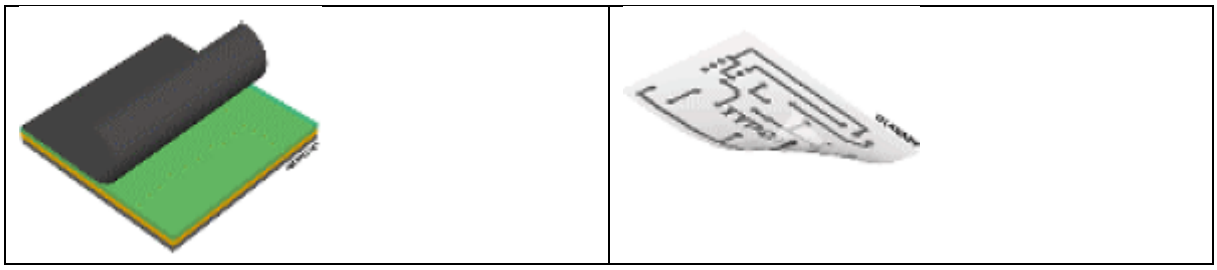
Bien que la plupart des cartes de circuits imprimés soient plates et rigides, il existe des PCB innovants capables de fléchir dans presque toutes les directions sans se casser. Les circuits flexibles nécessitent une forme d'isolation similaire mais unique. Un spray isolant PCB est souvent utilisé pour protéger les circuits flexibles, bien que le film plastique soit également une option populaire. Les circuits flexibles nécessitent un revêtement d'isolation PCB mince mais robuste qui leur permettra de se déplacer librement et de s'intégrer dans des espaces restreints et restreints.

### 4.2.5 METAL

Il peut sembler étrange de choisir le métal comme isolant. Les métaux sont généralement conducteurs et une conductivité accidentelle peut entraîner un dysfonctionnement, un raté ou la fonte de votre PCB. Cependant, dans certains cas, il peut être plus avantageux pour un PCB d'avoir un substrat métallique. Le métal est un excellent conducteur thermique, lui permettant de gérer des courants électriques extrêmement puissants sans ne se casser ni brûler. Les PCB installés dans des appareils alimentés qui consomment une grande quantité d'électricité peuvent avoir besoin d'un substrat métallique pour fonctionner efficacement.

### 1.2.3. Préparation

Dans cette étape il faut maitre le typon dans l'insoleuse en vérifiant bien son sens. Pour que l'insolation puisse s'effectuer, il faut retirer l'adhésif opaque qui protège la couche photosensible des rayons ultra-violets de la lumière ambiante. Une fois l'adhésif retiré, placez la plaque pré sensibilisée dans l'insoleuse, avec le typon côté cuivre comme le montre la figure suivante.

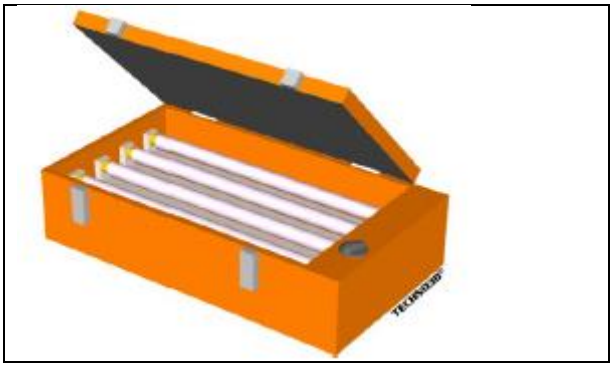


### 1.2.4. Insolation

C'est une procédure réaliser avec une insoleuse dont il fut Fermer le capot protecteur de l'insoleuse et réglez la minuterie sur 2 min 30 sec comme le montre la figure suivante :

· Une insoleuse est principalement constituée de puissants tubes néon UV et d'une vitre totalement transparente sur laquelle on déposera la plaque.

· Une fois fermée elle ne laisse pas passer la lumière car les UV présentent un danger particulièrement pour nos yeux.



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 comme le montre la figure suivante.

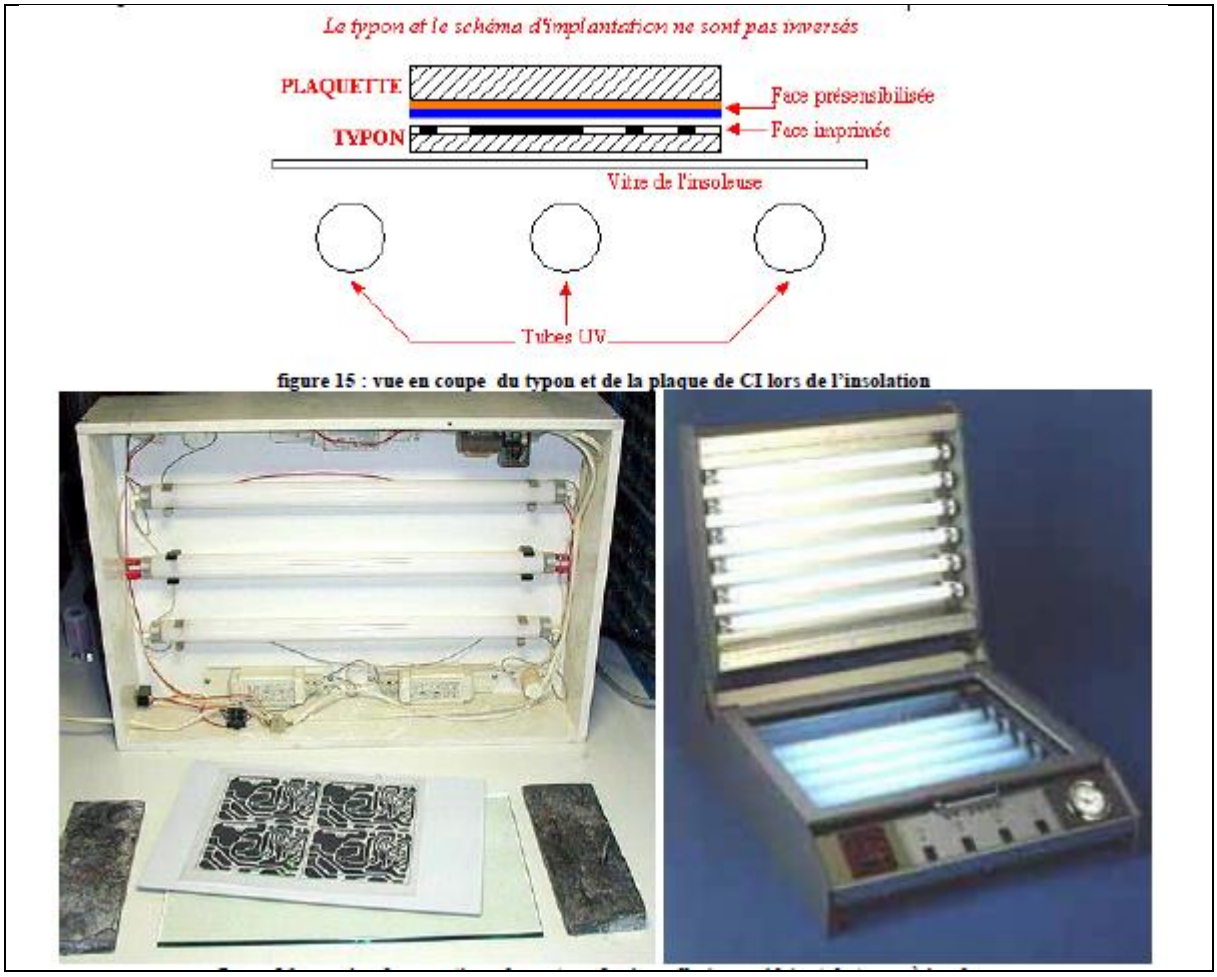
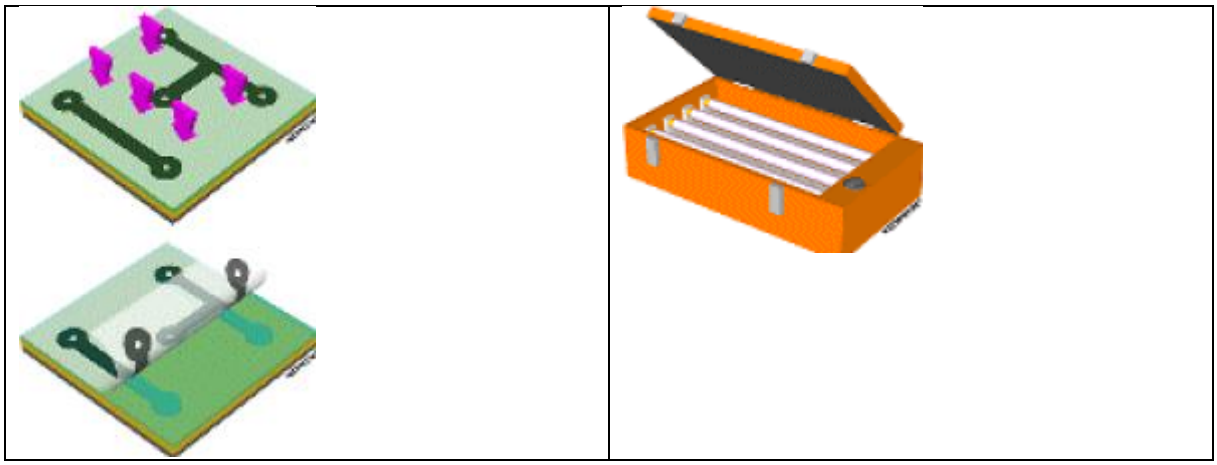



**figure 15 : vue en coupe du typon et de la plaque de CI lors de l'insolation**



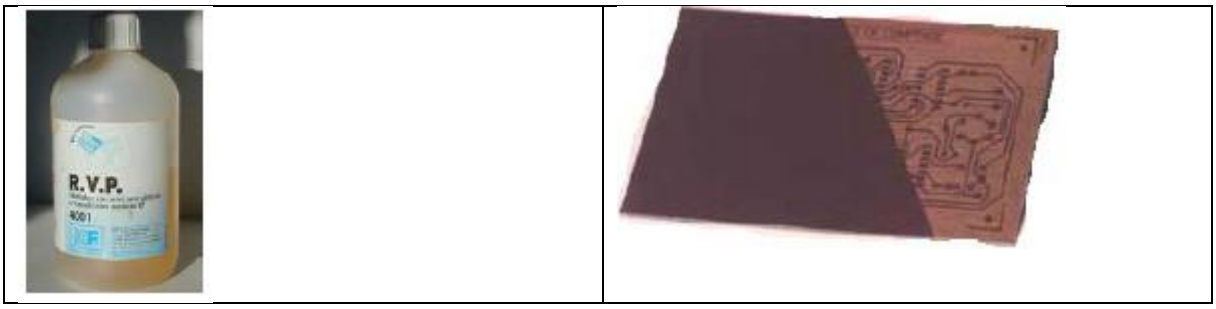
Les ultra-violets émis par les tubes de l'insoleuse vont détruire la couche photosensible aux endroits non protégés par le tracé du typon. Lorsque la minuterie s'arrête, ouvrez le capot protecteur de l'insoleuse et sortez la plaque pré sensibilisée. Vous devez pouvoir observer le tracé des pistes imprimé sur la résine comme le montre la figure suivante.



### 1.2.5. 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.

Trempez la plaque pré sensibilisée dans le bain révélateur en suivant bien les consignes de sécurité. Si le révélateur est récent ou très actif, l'opération risque d'être très courte ! Observez bien l'action du produit qui désagrège la couche photosensible brûlée par les ultra-violets, ne laissant que le tracé des futures pistes sur la couche de cuivre.



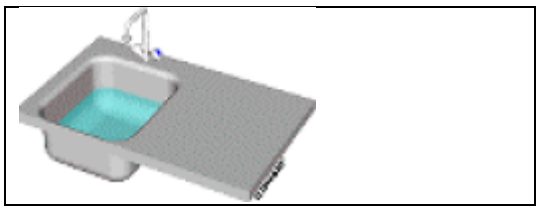

Remarque :

Le révélateur est un produit chimique que l'on peut le fabriquer soi-même, puisqu´il s´agit d´une simple solution de soude caustique à 7g/l comme le Destop (produit pour déboucher les canalisations). Cependant on la trouve à l'achat déjà dosée. Sa manipulation nécessite des précautions comme le port de gants.

L'efficacité du révélateur est meilleure quand il est tiède.

### 1.2.6. Rinçage

Rincez abondamment la plaque pré sensibilisée dans l'eau. Le révélateur est encore actif si vous ne l'enlevez pas totalement.

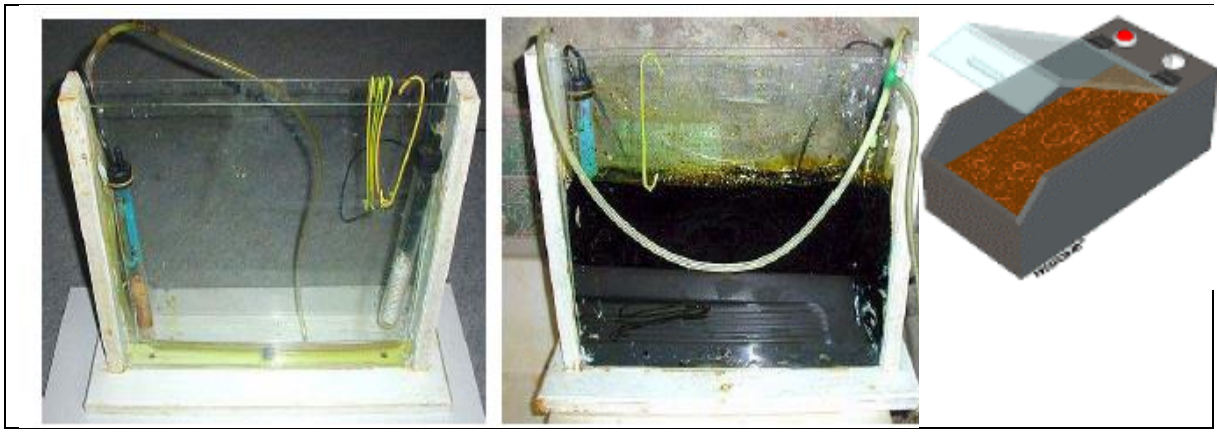


### 1.2.7. Gravure

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 mousseur pour activer la réaction chimique avec le cuivre de la plaque.

Alors il faut Placez la plaque pré sensibilisée dans la graveuse en suivant bien les consignes de sécurité. Réglez la minuterie sur 20 min. Le perchlorure de fer décompose le cuivre qui n'est pas protégé par la couche photosensible : le cuivre sera donc éliminé sur toute la plaque sauf sur les pistes tracées sur le typon comme le montre la figure suivante.

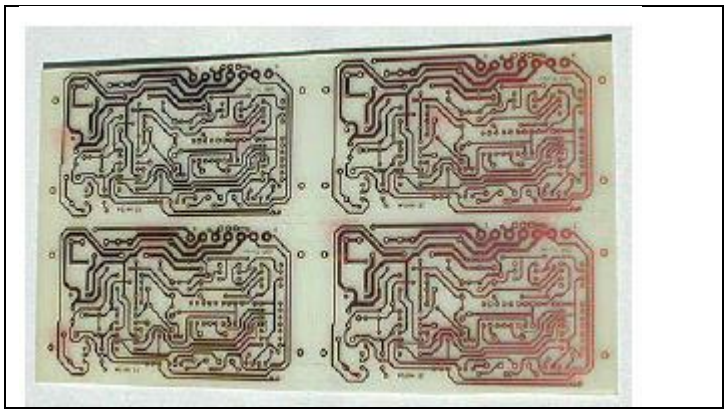


### 1.2.8. Nettoyage

Nettoyez le circuit imprimé à l'aide d'un chiffon imbibé d'alcool jusqu'à faire disparaître la couche photosensible encore présente sur les pistes, et devenue maintenant inutile.

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 comme le montre la figure suivante.



### 1.2.9. Vernissage

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

## 1.3 Perçage du PCB

Avant de souder les composants, il nous faut percer les pastilles. Ces trous correspondent à l'emplacement des pattes des composants. Pour cela on utilise une perceuse à colonne.

- On place le circuit imprimé sur le support.
- On choisit la taille du foret en fonction des composants qui devront être soudés (entre 0.6mm et 1.5mm) Une fois toutes les pastilles percées au bon diamètre on va pouvoir souder les composants. donc on peut dire qu'il existe 3 dimensions de pattes de composants :

+ Pour les petits composants (circuits imprimés, fils, etc.) on percera avec un foret de 0,6 mm à 0,8 mm

+ Pour les composants moyens (résistances, condensateurs, certaines diodes, LED, etc.) on

percera avec un foret de 0,8 mm à 1 mm

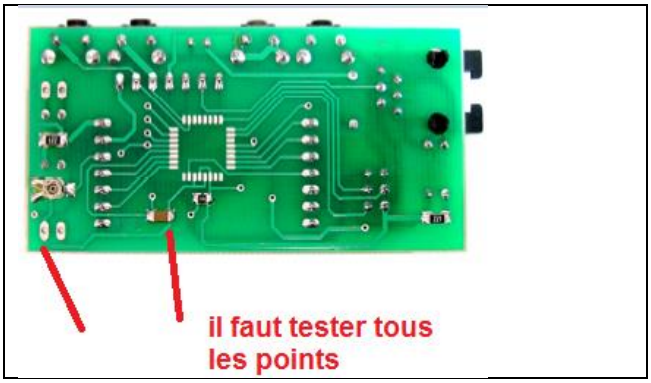
+ Pour les gros composants (relais, bornier de raccordement, certaines diodes, etc.) on percera avec une foret de 1 mm à 1,2 mm

### 1.3.1 Test des pistes du PCB

Avant de commencer à souder les composants sur le circuit imprimé, il faut tester la continuité des différentes pistes, à la recherche d'éventuelles microcoupures. Une microcoupure est une coupure microscopique dans la piste de cuivre (due par exemple à

une railleur), qui ne se voit pas à l'œil nu, pas qui empêche tout de même la passage du courant. Pour tester la continuité des pistes, on utilisera un ohmmètre.

En cas de microcoupure réelle, faites une petite marque au crayon sur l'époxy (et pas sur le cuivre !), à côté de la microcoupure : vous réparerez cette microcoupure au fer à souder, lors de la soudure des composants.




## 1.4 Soudage des composants

### 1.4.1 Matériel nécessaire

Pour assurer le bon fonctionnement de cette phase très importante du développement des circuits imprimés il faut un minimum d'outillage.

- **Le fer à souder**

Le fer à souder est composé d'une résistance électrique dont la chaleur s'écoule idéalement vers la pointe du Fer appelée panne qui doit être la plus fine possible pour réaliser des soudures parfois délicate (mauvais emplacement, zone trop petite pour réaliser une soudure etc. …). Un panne de +/- 2mm est suffisante pour faire souder des composants.

- **Eponge**

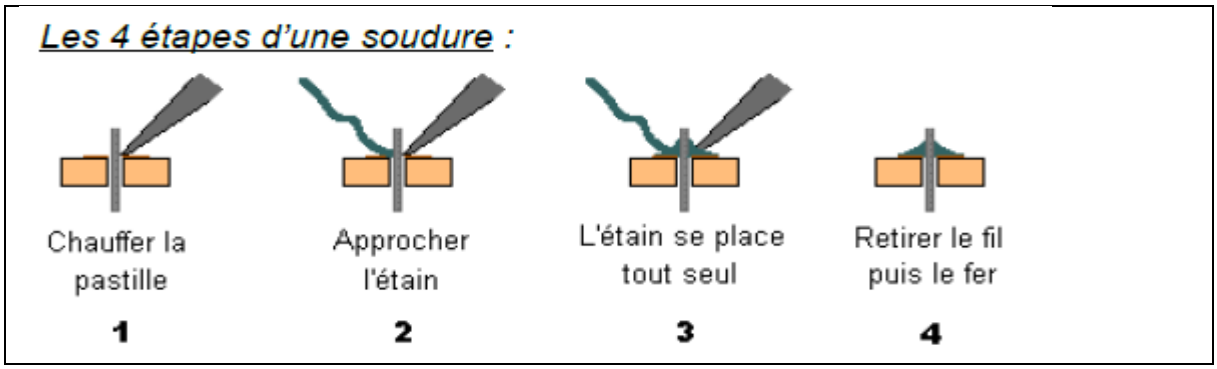
Il faut essuiera la pointe du fer dès qu'elle semble s'encrasser avec l'étain. La point (la panne) doit être toujours être recouverte d'une fine pellicule de soudure sans traces de résine ou de plastique fondu.

### 1.4.2 Le soudage

Pour réaliser des soudures sur circuit imprimé on utilise un fer à souder d'un puissance comprise entre 25 et 40 watts. La panne, extrémité chauffante, doit être maintenue propre par un nettoyage fréquent sur une éponge mouillée. La soudure est constituée d'un mélange d'étain et de plomb. On adoptera un mélange à 60% d'étain.

- **Soudure manuelle**

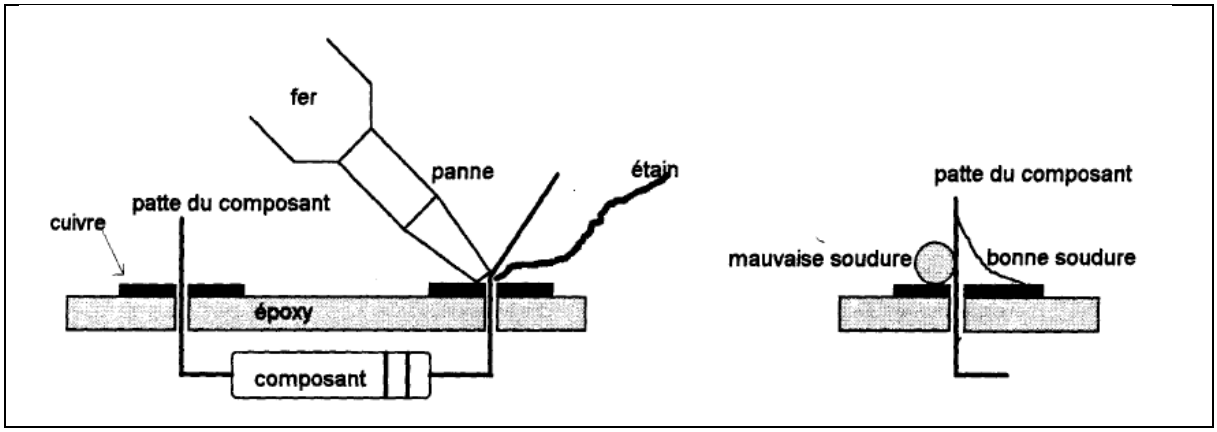
Les soudures doivent respecter quelques règles.




Remarque :

Une mauvaise soudure peut par exemple conduire à des courts circuits si deux pistes sont reliées par erreur. Pour souder efficacement il faut maintenir la panne du fer contre les parties à souder et les chauffer ensemble pendant 2 à 3 secondes puis déposer l'étain sur les parties métalliques à unir, laisser fondre la soudure pour constituer un cône et enfin retirer l'étain puis le fer à souder. L'étain ne doit pas être déposé directement sur le fer, mais sur les pattes des composants qui ont été préalablement chauffées.

Pour obtenir de belles soudures en forme de cône bien lisse et brillant, il faut chauffer les parties métalliques avant d'appliquer l'étain, et appliquer l'étain uniquement sur des parties bien chaudes afin qu'il puisse facilement et naturellement s'étaler et recouvrir toutes la surface à souder. Attention tout de même, certains composants en plastique craignent les chaleurs trop élevées (condensateurs, support de circuits intégrés, etc.), il faut donc parfois être rapide comme le montre la figure suivante.

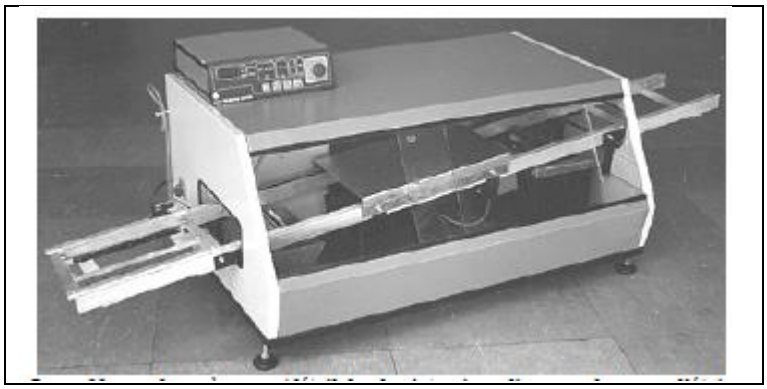



- **Soudure a la vague automatique**

La soudure à la vague est une technique utilisée dans l'industrie pour fixer un ensemble de microcomposants à la surface d'une carte électronique.

Contrairement au soudage manuel réservé à la fabrication de prototypes et préséries, le soudage à la vague permet de fixer la totalité des composants électroniques en une seule opération.

L'opération de soudure à la vague est précédée du positionnement manuel ou automatique des composants sur le circuit imprimé. Les cartes électroniques vont ensuite effleurer la surface d'un bain d'alliage de plomb et d'étain fondus afin de procéder à l'assemblage des composants sur la carte.



- **Soudure infrarouge**

Ce four ce présente sous la forme "tunnel chauffant". On place les cartes à souder sur un convoyeur. La température du four est généralement programmable en fonction des besoins.

- **Soudure en phase vapeur**

Ce four est constitué d'un liquide inerte fluoré. On chauffe le produit à 215° à cette température il produit une vapeur dans laquelle on trempe le circuit à souder. Ensuite on sort le circuit de la vapeur pour le refroidir. Contrairement à la soudure au four à infrarouge, la qualité des soudures n'est pas influencée ni par la taille des composants ni par leur couleur (voir figure suivante).

## Webographie


1. https://www.labcenter.com
2. https://www.engineersgarage.com
3. www.mentor.com/pads
4. https://www.instructables.com/Simulating-Designing-of-CircuitsPCB-on-Proteus/

Bibliographie :

5. "PCB Design Guidelines For Reduced EMI", Texas instrument
6. "Getting Started in PCB Design" , Mentor graphics
7. "IPC-7351 Generic Requirements for Surface Mount Design and Land Pattern Standard (footprints)", Mentor graphics
8. "A Basic Introduction for Designing a Printed Circuit Board (PCB) with EAGLE eCAD/CAM Software",Kenneth Kwashnak
9. "Power Consideration Discussions," data sheet for AD815 High Output Current Differential Driver,Analog Devices, Inc., http://www.analog.com/.
10. Walt Jung, Walt Kester, "Thermal Management," portion of Section 8 within Walt Kester, Editor,
11. Practical Design Techniques for Power and Thermal Management, Analog Devices, Inc., 1998,ISBN 0-916550-19-2.
12. General Catalog, AAVID Thermal Technologies, Inc., One Kool Path, Laconia, NH, 03246, (603) 528-3400.
13. Seri Lee, "How to Select a Heat Sink," Aavid Thermal Technologies, http://www.aavid.com