

Université de Boumerdès

Faculté de Technologie



Spécialité: Electronique des systèmes embarqués

Module: Cartes à puces

**Chapitre 2: Technologie des cartes à puces
électroniques**

Dr S. BELKACEM

2022/2023

1) Semi-conducteurs pour carte à puce

- Le cœur d'une carte à puces est constitué d'un composant **électronique monolithique** en silicium introduit dans l'épaisseur d'une carte en plastique.
- Il existe différentes "**technologies**" de fabrication de circuits intégrés
- **technologie** = technique utilisée (parmi plusieurs) pour implanter les composants (transistors) dans le matériau semiconducteur
- Le cœur d'une carte à puce est constitué d'un composant **électronique monolithique** en silicium introduit dans l'épaisseur d'une carte en plastique.
- **Monolithique** signifie d'un seul bloc, c'est-à-dire que les composants passifs et actifs sont tous réalisés au cours des mêmes opérations sur un même substrat.

2) Technologie des circuits intégrés

- Le circuit intégré (CI), aussi nommé **puce électronique**, est un composant électronique reproduisant une ou plusieurs fonctions électroniques plus ou moins complexes, intégrant fréquemment plusieurs types de composants électroniques de base dans un volume réduit,...

2) Technologie des circuits intégrés

- Les circuits intégrés sont aussi classés par leur technologie :
 - le type de transistors,
 - la manière dont les transistors sont connectés,
 - la technique utilisée pour fabriquer les transistors.
- Les principales technologies de fabrication sont...
 - les circuits **TTL** (transistor-transistor logic) et
 - les circuits **MOS** (metal-oxide semiconductor).
 - Transistor unipolaire
 - Faible consommation
 - Grande capacité d'intégration

2) Technologie des circuits intégrés

- Les circuits intégrés **TTL** utilisent des transistors bipolaires et sont de la catégorie **SSI** ou **MSI**.
 - Inventée dans les années 1960
 - Sa consommation énergétique élevée (comparativement aux circuits MOS).
- Les circuits intégrés **MOS** sont à base de transistors MOS à effet de champ (**MOSFET**) et sont de la catégorie **LSI** ou **VLSI**.

2) Technologie des circuits intégrés

- Les circuits intégrés sont souvent classés suivant le nombre d'éléments ou le **nombre de fonctions** intégrés sur un seul morceau, ils sont nommés par des abréviations d'expressions américaines : SSI (small scale integration), MSI (medium scale integration), LSI (large scale integration), VLSI (very large scale integration) et ULSI (ultra large scale integration).

2) Technologie des circuits intégrés

- Les limites qui séparent ces catégories sont basées sur le nombre de fonctions ou d'éléments dans un seul circuit.
 - Les circuits **SSI** (small scale integration: Intégration à petite échelle): comportent moins de 12 fonctions ou moins de 50 éléments et de 1 à 10 transistors , date de sortie est 1964.
 - Les circuits **MSI** (medium scale integration: Intégration à moyenne échelle): comportent de 12 à 100 fonctions ou de 50 à 500 éléments et de 10 à 500 transistors , date de sortie est 1968.
 - Les circuits **LSI** (large scale integration: Intégration à grande échelle): comportent de 100 à 1000 fonctions ou de 500 à 10 000 éléments et de 500 à 20 000 transistors , date de sortie est 1971.
 - Les circuits **VLSI** (very large scale integration: Intégration à très grande échelle): comportent de 1000 à 10000 fonctions ou de 10 000 à 99 999 éléments et de 20 000 à 1 000 000 transistors , date de sortie est 1980.
 - Les circuits **ULSI** (ultra large scale integration: Intégration à très très grande échelle): comportent plus de 100000 fonctions et plus de 1 000 000 transistors , date de sortie est 1984.

2) Technologie des circuits intégrés

Il existe deux larges classifications des circuits intégrés:

2.1) Les circuits intégrés hybrides

- Sont construits sur un substrat isolant.
- Le cœur du circuit est une puce monolithique qui est fixées sur le substrat,
- La puce est connecté à d'autres éléments qui ont été fabriqués directement sur le substrat.
- Les circuits hybrides sont classés selon la manière dont sont fabriqués les autres éléments (résistor, condensateur, ...), on a ou bien un “thin film” ou bien un “thick film”.

2) Technologie des circuits intégrés

2.2) Les circuits intégrés Monolithiques

- Disposition d'éléments électroniques complexes dans un élément **semi-conducteur unique**.
- Par modification locale du semi-conducteur, et plus particulièrement par **dopage** (Dopage: Amélioration de la conductivité des zones des futurs transistors avec des ions dopants), différentes fonctions électroniques locales peuvent être intégrées dans différentes zones du semi-conducteur.
- Avec les procédés de **photolithographie**, de gravure plasma, des circuits locaux peuvent être créés pour **assurer la communication** entre les éléments électroniques locaux réalisés dans le semi-conducteur.
- Typiquement, l'épaisseur du support semi-conducteur est au plus de 0,4 mm.
- Les éléments (transistors, résistors, condensateurs et diodes) sont isolés les uns des autres par des **jonctions p-n en opposition**

3) Fabrication des CI

Salle blanche

Plusieurs étapes de lithographie sont nécessaires pour les réaliser sur les puces, elles-mêmes produites en série sur un unique wafer. Et cela, dans l'environnement ultra-confiné des salles blanches.

- Une salle blanche (ou plus exactement salle propre selon la norme **ISO 14644-1**) est une pièce ou une série de pièces où la concentration particulaire est maîtrisée afin de minimiser l'introduction, la génération de particules à l'intérieur, généralement dans un but spécifique industriel ou de recherche scientifique. Les paramètres tels que la température, l'humidité et la pression relative sont également maintenus à un niveau précis (définition selon la norme ISO 14644-1).



Salle blanche de la NASA.

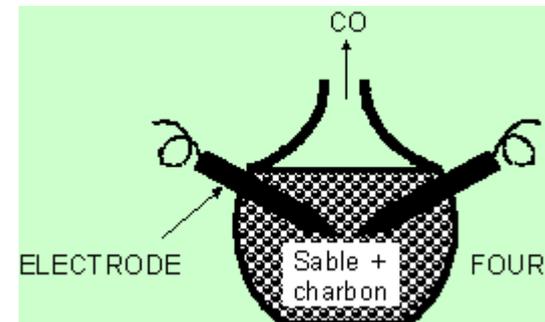
3) Fabrication des CIs

3.1) La purification

De la silice (sable) au silicium

Le Si se trouve en abondance dans la nature sous la forme de silice (sable) → pb pureté

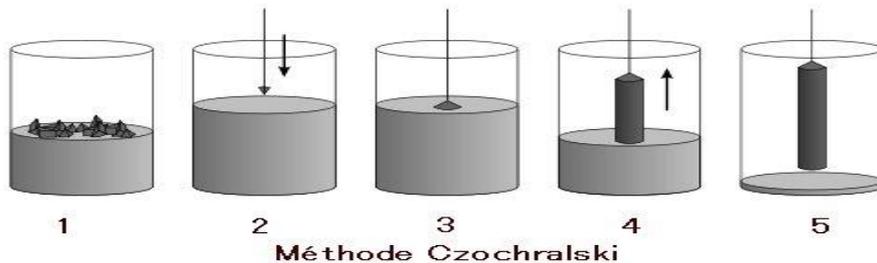
- Deux étapes sont nécessaires pour passer du silicium **amorphe** au silicium **monocristallin** tout en augmentant sa pureté.
- **1^{ère} étape : Purification chimique**
 - Le sable est mélangé à du carbone en quantité appropriée. Le tout est introduit dans un four à arc
 - Le silicium ainsi obtenu s'appelle silicium métallurgique (*Metallurgical grade silicon, MGS*), sa pureté dépend du matériau de départ elle est de l'ordre de 98%.



3) Fabrication des CI

3.1) La purification

- **2^{ème} étape** : Etape de tirage par le procédé Czochralski (80% des cas)
 - Silicium polycristallin porté à fusion dans un creuset (1450°C).
 - Mise en contact d'un germe monocristallin.
 - Le liquide se solidifie sur le germe en gardant la même orientation cristalline (Epitaxie).
 - Tirage du germe (vitesse de l'ordre du mm/heure). Rotation du germe et du creuset.

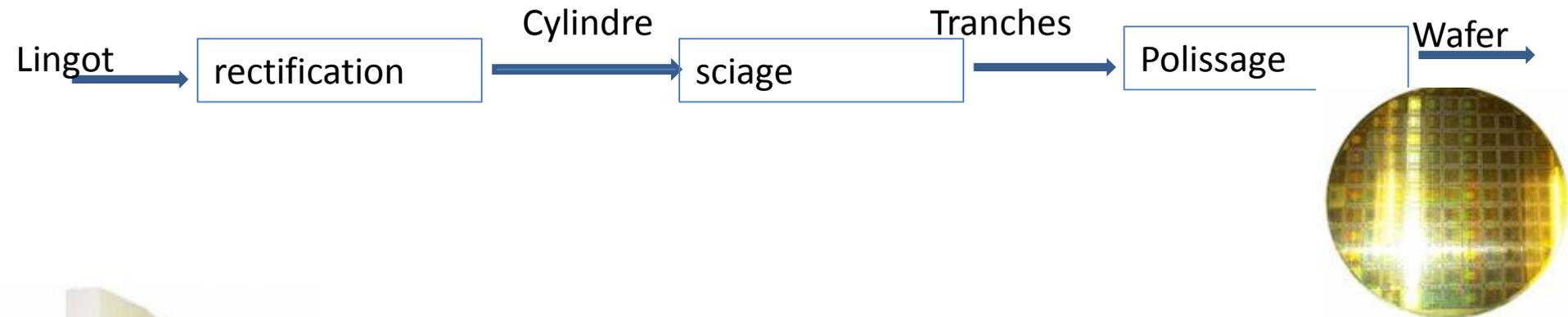


- Obtention d'un lingot de silicium monocristallin (60 à 100 kg, 2 m de long, 300 mm de diamètre)

5) Fabrication des CIs

3.2) Opération mécanique

- Une fois le tirage monocristal réalisé=> lingot de structure monocristalline



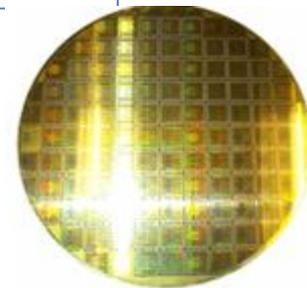
Machine utilisée pour le polissage



Les barres une fois refroidies



Découpage en wafers



5) Fabrication des CI

3.3) Exemple de fabrication d'un transistor MOS



①



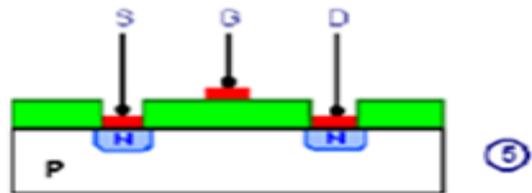
②



③



④



⑤

1) Préparation du substrat

2) Oxydation thermique

3) Photogravure : ouverture dans la couche d'oxyde des fenêtres pour le drain et la source (1^{er} masque)

4) Diffusion du drain et de la source

5) Dépôt métallique sur drain, source et grille (2^{eme} masque)
Réalisations des connexions de sortie

Figure 4 : Réalisation d'un transistor MOS à enrichissement (canal N)

4) Étapes de construction d'une carte à puce

1. La conception : la spécification de la taille de la mémoire de la puce, la vitesse d'horloge, les types de mémoire volatile, le type de système d'exploitation et la spécification du logiciel d'application
2. Fabrication des puces: à partir de tranches circulaires de silicium (wafer), **Découpage** des puces -Interconnexion des plots de la puce aux contacts du module
3. charger le code dans la mémoire en utilisant des commandes spéciales
4. Charger des données dans la mémoire PROM (les données concernent une seule personne).

4) Étapes pour fabrication du corps de la carte

- Le processus de fabrication du corps de carte commence par
 1. La sélection du matériaux
 - Acrylonitrile butadiène styrène (ABS) matériau est utilisé lorsque la stabilité de la température et le recyclage sont les principales exigences du client
 - Le matériau de base utilisé pour les cartes est fourni sous forme de feuille pour le laminage
- dépend des exigences du client.
- Les cartes PVC sont utilisées si le client :
 - A besoin d'un matériau recyclable à faible coût.
 - exige une stabilité à haute température et une résistance mécanique élevée.

4) Étapes pour fabrication du corps de la carte

Matériaux	Avantage (+)/inconvénients (-)
PVC	(+) Prix bas, nombreuses années d'expérience, recyclage possible (-) Compatibilité environnementale, stabilité thermique limitée
PC	(+) stabilité à haute température et résistance mécanique, recyclage possible (-) prix élevé, faible résistance aux rayures (scratch)
ABS	(+) moulage par injection approprié, stabilité à la température, recyclage possible (-) n'est pas conforme à la norme ISO, n'est pas classé comme écologique
PETG	(+) meilleur matériau concernant la compatibilité environnementale, prix moyen, recyclage possible (-) processus pas aussi facile et aussi connu que pour le PVC

4) Étapes pour fabrication du corps de la carte

Critère du choix du matériau

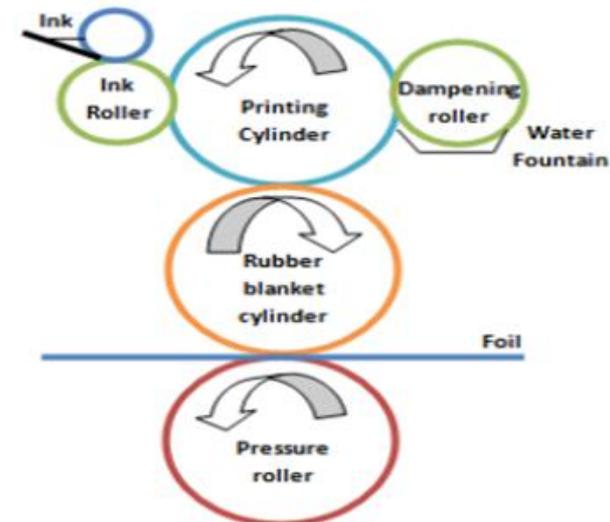
1. Possibilité de laminage et moulage par injection
2. Précision de la taille
3. Imprimabilité
4. durée de vie
5. Stabilité thermique
6. résistance à l'humidité
7. physiologiquement inoffensive
8. Compatibilité environnementale pendant la production et l'utilisation

4) Étapes pour fabrication du corps de la carte

2. Technologies d'impression

l'impression, la plastification ou **moulage par injection** du corps de carte dans la première phase et suivi de la personnalisation de la carte

- a) L'impression offset est la technique d'impression la plus utilisée dans laquelle nous utilisons des plaques d'impression à quatre couleurs ou à cinq couleurs. Ces plaques sont montées sur le cylindre d'impression de la machine, qui tourne continuellement contre un rouleau amortisseur et des rouleaux d'encre



4) Étapes pour fabrication du corps de la carte

2. Technologies d'impression

- b) La sérigraphie est une technologie plus ancienne et n'est pas fréquemment utilisée dans la production en raison de son taux de production plus lent.
- c) L'impression numérique est rarement utilisée dans la production en raison de son coût de production plus élevé. L'impression numérique présente l'avantage de pouvoir imprimer chaque carte de manière unique.

4) Étapes pour fabrication du corps de la carte

3. Laminage

- Les feuilles de plastique imprimées, ainsi que les couches internes des cartes, sont rassemblées et alignées dans une structure en sandwich.
- Les couches peuvent être de différents types et fonctions
 - Feuille extérieure sur laquelle le recto de l'illustration de la carte est imprimé

4) Étapes pour fabrication du corps de la carte

- Feuille extérieure sur laquelle le verso de l'illustration de la carte est imprimé
- Des feuilles de recouvrement transparentes, pour
 - protéger les feuilles imprimées
 - pour donner une finition brillante
- Les feuilles de noyau en plastique en PVC, ABS, Teslin ou d'autres matériaux qui ajoutent l'épaisseur requise au corps de la carte ou peuvent servir de matériau de base optimal pour la prochaine étape de personnalisation, telle que la gravure au laser.
- Feuille magnétique
- Feuilles contenant des antennes sans contact et des puces
- Films de sécurité contenant des hologrammes ou d'autres éléments de sécurité.

4) Étapes pour fabrication du corps de la carte

RQ

- La composition la plus courante des cartes est constituée de quatre à cinq couches.
- Pour les cartes sans contact et les cartes d'identité, jusqu'à neuf couches sont assemblées.



4) Étapes pour fabrication du corps de la carte

RQ

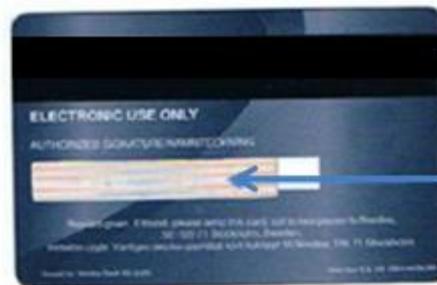
- Quels que soient le nombre de couches utilisées, les paramètres physiques d'une carte étant définis par les cartes d'identification ISO / IEC 7810 - Caractéristique physique l'épaisseur de la feuille doit être de 0,76 mm ($\pm 0,08$ mm).
- Les cartes contenant des composants électroniques tels que des piles, des écrans LCD, des boutons ou des capteurs d'empreintes digitales sont généralement plus épaisses que les 0,76 mm spécifiés.

4) Étapes pour fabrication du corps de la carte

- 4) Fonctions spéciales / Add-ons

 - *Panneau de signature*

- Un panneau de signature est utilisé dans toutes les cartes bancaires, car l'utilisateur doit signer sa carte avant de l'utiliser.
- Les panneaux de signature sont appliqués avec deux techniques différentes : plastification ou estampage à chaud.



Panneau de
signature

4) Étapes pour fabrication du corps de la carte

– *Bande magnétique*

- La bande magnétique est considérée comme l'élément principal des cartes de paiement traditionnelles.



4) Étapes pour fabrication du corps de la carte

– *Hologramme*

- Un hologramme est utilisé comme élément de sécurité (cartes de crédit ou de débit).
- Un hologramme est une forme de photographie avancée qui permet d'enregistrer une image en trois dimensions (3D).
- Pourquoi utiliser un hologramme comme outil de renforcement de la sécurité?
 - Il n'est pas possible de dupliquer un hologramme avec un scanner ou une photocopieuse couleur
 - Il n'est pas possible de fabriquer ou de copier un hologramme avec des procédés d'impression standard
 - Les niveaux initiaux de sécurité visuelle peuvent être utilisés pour intégrer des niveaux de contrôle supplémentaires pour une carte.
- Comment intégrer un hologramme sur une carte?
 - Un hologramme est appliqué sur la carte sous forme de couche transparente, grâce à un ruban spécial.

4) Étapes pour fabrication du corps de la carte

– *Gilloche*

- Le graphique guilloché fait référence à des motifs de ligne complexes formés de deux autres courbes tracées selon des principes mathématiques.
 - Les motifs en guillochis fournissent une protection anti-contrefaçon.
 - Elles sont utilisées dans presque tous les billets dans le monde entier.



4) Étapes pour fabrication du corps de la carte

– *Le microtexte et le texte ultraviolet*

- Le microtexte et le texte ultraviolet sont des éléments de sécurité fournis par les fabricants en complément de la demande du client. Le microtexte **ne peut pas être lu à l'œil nu**. Cela ressemble à une simple ligne, donc il faut une loupe pour le lire.
- Pour **lire le texte ultraviolet**, il faut une **lumière ultraviolet** car cette impression utilise un type d'encre spécial qui ne peut être vu que sous une lumière ultraviolet.



5) Étapes pour fabrication de la puce

- La fabrication de la puce électronique suit le même processus de fabrication d'un circuit intégré depuis le développement jusqu'à son extraction du Wafer.

6) Étapes pour fabrication de la carte à puce sans contact

Les étapes sont au nombre de trois :

1. La réalisation de l'antenne sur un support diélectrique plastique (**polychlorure de vinyle (PVC)**, **polyesters (PET)**, **polycarbonate (PC)**...) utilisant la gravure chimique du cuivre ou de l'aluminium
2. La connexion des plots de contact de la puce sur les plots de contact de l'antenne à l'aide d'encre ou d'époxy ou de polymères conducteurs, appelée communément technique de report flip-chip
3. La lamination sous pression à chaud des deux couches plastiques inférieure et supérieure du corps de carte (PVC, PET, PC, acrylonitrile-butadiène-styrène (ABS)...), sur le support de l'antenne afin de former une carte monobloc.

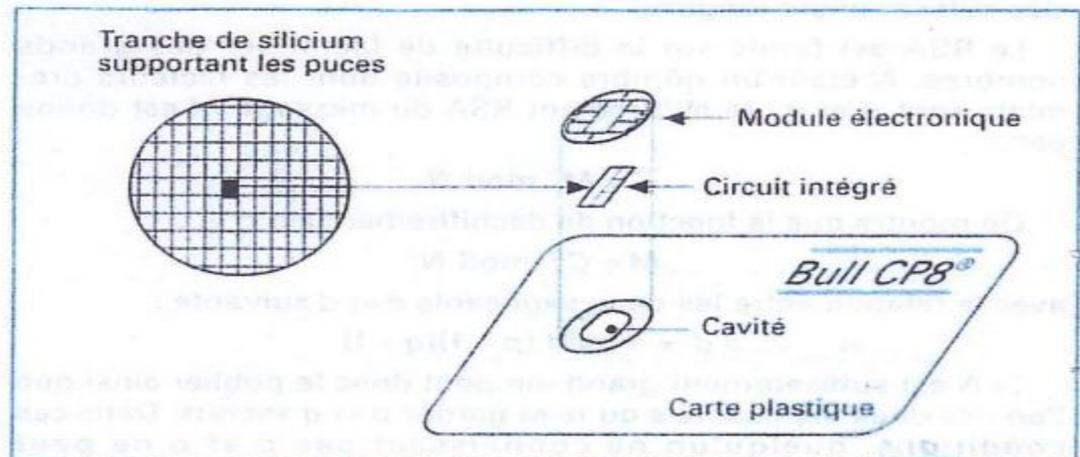
7) Étapes pour construire une carte à puce

1) Interconnexion des composants

- Cette opération consiste à relier électriquement les plots du composant aux contacts électriques du module. Ce câblage peut se faire selon plusieurs techniques de base :



wafer (source : wikipédia)



8) Étapes pour construire une carte à puce

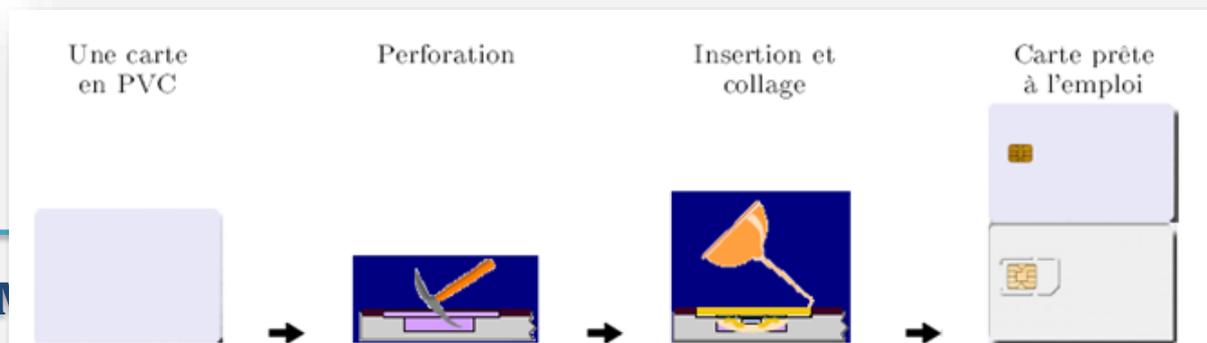
1) Interconnexion des composants

- le **wire bonding** se fait en utilisant du fil d'or ou d'aluminium, dont le diamètre est voisin de $10\mu\text{m}$ à $20\mu\text{m}$ et dont les soudures sur les plots des composants sont réalisées par thermo compression ou ultrason. La répétition des soudures est nécessaire pour chaque extrémité du fil
- **TAB** (Tap Automated Bonding) utilise un ruban continu découpé et soudé directement
- **Grille métallique** semblable à celle des composants classique avec un raccordement en fils. Les modules câblés sont protégés par une résine d'enrobage avant d'être encartés.

8) Étapes pour construire une carte à puce

2) Encartage collage du module électronique dans la carte

- La dernière étape de la fabrication de la carte à puce est d'insérer le module dans la carte en PVC.
- A partir d'une carte vierge, une cavité est creusée afin que le module de la puce soit inséré et collé. Les cartes en PVC peuvent être préparées directement avec une cavité pour faciliter l'insertion du module.



9) Étapes pour construire une carte à puce

3) Connectique

- Le module électronique supporte les contacts qui assurent les différentes liaisons électriques avec le monde extérieur.
- La qualité des contacts est liée à la conception du connecteur
 - Connecteurs frottant : peuvent entraîner des actions abrasives néfastes
 - Connecteurs à contacts « atterrissant », qui ont une fiabilité supérieures sans endommager les cartes