

6.8. Les circuits intégrés

6.8.1. Notion d'intégration

6.8.1.1. Principe

Un circuit intégré est un composant électronique qui regroupe, sur un même substrat (puce, chip), l'ensemble des composants électroniques nécessaires pour réaliser une fonction donnée (logique ou analogique) rendant le circuit facile à mettre en œuvre..

Il est constitué de :

- composants actifs : transistors bipolaires ou unipolaires ;
- composants passifs : diodes, résistances, condensateurs, ... ;
- connexions entre composants.

Ces éléments sont diffusés sur le substrat.

A titre indicatif et pour donner une idée du degré de complexité et de miniaturisation que peuvent atteindre ces circuits, disons qu'actuellement certains d'entre eux comportent plusieurs centaines de milliers de transistors sur une surface de quelques millimètres carrés.

L'image ci-dessous (Fig 6.8.1) illustre un cas d'un circuit intégré monté en surface sur un circuit imprimé.

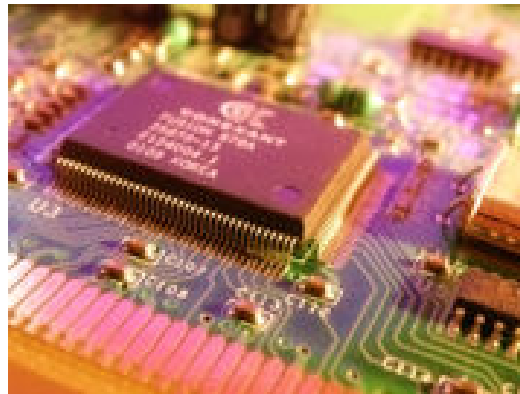


Fig. 6.8.1

6.8.1.2. Catégories

Il existe une très grande variété de ces composants divisés en deux grandes catégories : analogique et numérique.

➤ Les circuits intégrés analogiques

Les composants les plus simples peuvent être de simples transistors encapsulés les uns à côté des autres sans liaison entre eux, jusqu'à des assemblages réunissant toutes les fonctions requises pour le fonctionnement d'un appareil dont il est le seul composant.

Les amplificateurs opérationnels et les régulateurs de tension intégrés sont des représentants de moyenne complexité de cette grande famille où l'on retrouve aussi des composants réservés à l'électronique haute fréquence et de télécommunication.

Un exemple de circuit analogique : L'amplificateur opérationnel LM741.

➤ Les circuits intégrés numériques

Les circuits intégrés numériques les plus simples sont des portes logiques simples (et, ou, non, etc), les plus compliqués sont les microprocesseurs et les plus denses sont les mémoires. On trouve de nombreux circuits intégrés dédiés à des applications spécifiques, notamment pour le traitement du signal (traitement d'image, compression vidéo...) on parle alors de DSP (pour Digital Signal Processor). Une famille importante de circuits intégrés est celle des composants de logique programmable (FPGA, CPLD). Ces composants sont amenés à remplacer les portes logiques simples en raison de leur grande densité d'intégration.

6.8.1.3. Avantages de l'intégration

Les avantages sont très nombreux. Citons en particulier :

- la fabrication de circuits intégrés en grande quantité entraînant une réduction du coût de fabrication,
- une fiabilité excellente par la réduction du nombre de composants discrets,
- une consommation de plus en plus réduite,
- la possibilité de réaliser des circuits très complexes dans un encombrement très réduit.

6.8.1.4. Inconvénients de l'intégration

Néanmoins, il existe certaines limites à l'intégration de certains composants ainsi que quelques contraintes à leur emploi. Nous pouvons citer par exemple :

- l'intégration difficile de certains composants tels que les inductances et capacités de fortes valeurs, et les transistors de puissance ,
- le fait qu'un circuit intégré remplit une fonction bien déterminée rendant impossible toute modification par l'utilisateur,
- enfin, la conception d'un nouveau circuit intégré nécessite un investissement économique important. Cependant, il existe des circuits intégrés contenant des composants électroniques non interconnectés : les connexions peuvent être réalisées à la demande de l'utilisateur permettant ainsi la personnalisation de circuits intégrés (ASIC : Application Specific Integrated Circuits).

6.8.1.5. Degré d'intégration

Le degré (ou taux) d'intégration définit le nombre de transistors et autres composants élémentaires qu'ils contiennent dans une même puce. On utilise généralement la classification suivante :

- SSI (Small Scale Integration) ⇒ petite intégration : de 1 à 10^2 transistors (1960),
- MSI (Medium Scale Integration) ⇒ moyenne intégration : de 10^2 à 10^3 transistors (1966),
- LSI (Large Scale Integration) ⇒ grande intégration : de 10^3 à 10^5 transistors (1970),
- VLSI (Very Large Scale Integration) ⇒ très grande intégration : de 10^5 à 10^7 transistors (1986),
- ULSI (Ultra Large Scale Integration) ⇒ ultra haute intégration : $> 10^7$ transistors (actuellement).

Ces distinctions ont peu à peu perdu leur utilité avec la croissance considérable de la complexité des circuits intégrés. Aujourd'hui plusieurs centaines de millions de transistors (plusieurs dizaines de millions de portes) représentent un chiffre *normal* (pour un microprocesseur ou un circuit intégré graphique haut de gamme).

6.8.1.6. Taille des puces

Les progrès de la technologie ont permis d'accroître de façon considérable la taille des puces en même temps que le nombre de composants sur un même substrat.

A titre indicatif, vous trouverez ci-après quelques chiffres montrant cette croissance de taille au fil des années :

- 1,4 mm de côté en 1960 ;
- 8 mm de côté en 1980 ;
- quelques centimètres de côté en 1990.

6.8.1.7. Finesse du trait

La finesse du trait correspond à la largeur des connexions entre les éléments d'une puce. C'est un facteur d'intégration important puisque plus cette largeur est faible, plus le nombre de composants intégrés peut être important.

Les premiers circuits intégrés (vers 1960) avaient une finesse de trait $\approx 10 \mu\text{m}$. Là encore, l'extraordinaire progrès de la technologie a permis de réduire continuellement cette taille. Actuellement :

- 0,35 μm en 1996;
- 0,25 μm en 1999;
- 0,18 μm en 2002;
- 0,13 μm en 2005.

6.8.2. Les ASICs:

6.8.2.1. Définition

Les circuits ASIC constituent la troisième génération de circuits intégrés qui a vu le jour au début des années 80. En comparaison des circuits intégrés standards et figés proposés par les fabricants, l'ASIC présente une personnalisation de son fonctionnement, selon l'utilisation, accompagnée d'une réduction du temps de développement, d'une augmentation de la densité d'intégration et de la vitesse de fonctionnement. En outre sa personnalisation lui confère un autre avantage industriel, c'est évidemment la confidentialité. Ce concept d'abord développé autour du silicium s'est ensuite étendu à d'autres matériaux pour les applications micro-ondes ou très rapides (GaAs par exemple).

Par définition, les circuits ASIC regroupent tous les circuits dont la fonction peut être personnalisée d'une manière ou d'une autre en vue d'une application spécifique, par opposition aux circuits standards dont la fonction est définie et parfaitement décrite dans le catalogue de composants.

Les ASIC peuvent être classés en plusieurs catégories selon leur niveau d'intégration [LUCA94], en fait un ASIC est défini par sa structure de base (réseau programmable, cellule de base, matrice, etc.). Sous le terme ASIC deux familles sont regroupées, les semi-personnalisés et les personnalisés. La figure 6.8.2 ci-après illustre cette classification.

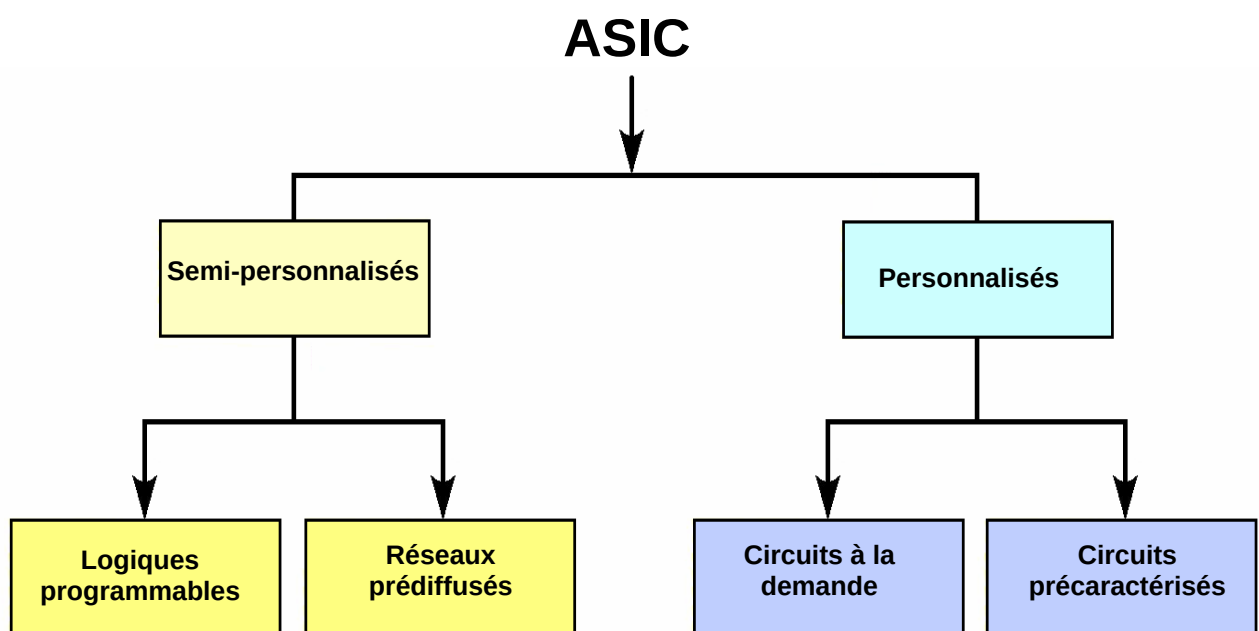


Fig. 6.8.2

6.8.2.2. Avantages et inconvénients de l'utilisation d'ASIC

D'une manière générale l'utilisation d'un ASIC conduit à de nombreux avantages provenant essentiellement de la réduction de la taille des systèmes. Il en ressort :

- Réduction du nombre de composants sur le circuit imprimé. La consommation et l'encombrement s'en trouvent considérablement réduits.
- Le concept ASIC par définition assure une optimisation maximale du circuit à réaliser. Nous disposons alors d'un circuit intégré correspondant réellement à nos propres besoins.
- La personnalisation du circuit donne une confidentialité au concepteur et une protection industrielle.
- Enfin, ce type de composant augmente la complexité du circuit, sa vitesse de fonctionnement et sa fiabilité.

Dans l'approche des circuits prédiffusés et personnalisés, l'inconvénient majeur réside dans le fait du passage obligatoire chez le fondeur ce qui implique des frais de développement élevés du circuit. En général le fondeur ne souhaite pas intervenir dans la phase de conception ; sa tâche est de réaliser le composant à partir des masques. Dans le but de réduire les surcoûts dus aux modifications, il s'avère nécessaire d'être rigoureux lors de la phase de développement de telle sorte que le circuit prototype fonctionne dès les premiers essais : c'est réussi dans environ 60% des cas. De plus dans de nombreuses applications, l'utilisateur doit concevoir les programmes de testabilité.

6.8.3. La technique la plus courante de fabrication des circuits intégrés

6.8.3.1. Introduction

La fabrication d'un circuit intégré est un procédé complexe dont la tendance est à se compliquer de plus en plus.

- Le motif de base est le transistor, et ce sont ensuite les interconnexions métalliques entre les transistors qui réalisent la fonction particulière du circuit.
- L'aluminium est souvent employé dans ce but, mais une technologie plus performante permet l'emploi du cuivre.
- On utilise parfois du silicium polycristallin, également conducteur, notamment pour la grille du transistor.

6.8.3.2. Principe

La technologie de fabrication des circuits intégrés est dérivée du procédé PLANAR : diffusions successives à travers des masques. Plus le circuit intégré est complexe, plus le nombre de masques à réaliser est important : jusqu'à 10 masques qui doivent être superposés avec une précision $< 1 \mu\text{m}$.

La fabrication des masques (très grande précision) nécessite l'utilisation de méthodes de CAO microélectronique.

La figure 6.8.3 illustre les principales étapes allant de la conception à la fabrication d'un circuit intégré.

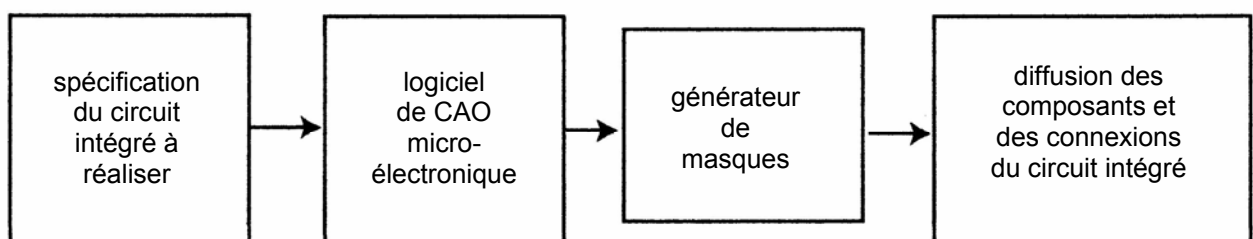


Fig. 6.8.3

6.8.3.3. Matière première

La matière première de base habituellement utilisée pour fabriquer les circuits intégrés est le silicium. Néanmoins, d'autres matériaux sont parfois employés, comme le germanium ou l'arséniure de gallium. Le silicium est un semi-conducteur dans sa forme monocristalline. Ce matériau doit être pur à 99,99%. On fabrique d'abord un *barreau* cylindrique de silicium en le cristallisant très lentement. Ce barreau est ensuite découpé pour être utilisé sous forme de galettes de 500 μm d'épaisseur et ayant jusqu'à 300 mm de diamètre, appelé *wafer* (galette, en anglais). Un wafer va supporter de nombreux circuits intégrés.

La figure 6.8.4 ci-dessous montre des microprocesseurs sur une tranche de silicium (*wafer*) qui sert à leur fabrication.



Fig. 6.8.4

6.8.3.4. Etapes de fabrication

A partir du schéma électronique du circuit intégré à réaliser, le logiciel de CAO produit un fichier contenant des commandes pour piloter un générateur de masques qui effectue la gravure des différents masques (composants + connexions).

La gravure utilise :

- des rayons lumineux pour la fabrication de motifs d'épaisseur $\geq 1 \mu\text{m}$;
- des rayons ultraviolets pour les épaisseurs comprises entre 0,1 et 1 μm ;
- des rayons X pour les épaisseurs $< 0,1 \mu\text{m}$.

Plus l'épaisseur du trait à graver est faible, plus la longueur d'onde du rayonnement utilisé doit être faible pour avoir une bonne précision de réalisation.

6.8.3.5. La photo lithogravure

C'est actuellement le procédé le plus répandu.

Etapes de fabrication

Le nombre d'étapes de la fabrication des circuits intégrés a cru considérablement depuis 20 ans. Il peut atteindre plusieurs dizaines pour certaines productions spécialisées. Toutefois, on retrouve à peu près toujours la même série d'étapes :

- Préparation de la couche : on expose le wafer à du dioxygène pur après chauffage pour fabriquer une couche d'oxyde (isolant) en surface, ensuite le wafer est recouvert d'un vernis photosensible.
- Transfert : on transfère le dessin du circuit à reproduire sur la surface photosensible à l'aide d'un masque, comme pour la peinture au pochoir, en l'exposant aux ultraviolets, (ou aux rayons X, pour les gravures les plus fines). Le vernis non soumis aux rayonnements est dissout grâce à un solvant spécifique.

- Gravure : l'oxyde de silicium est donc protégé par le vernis aux endroits exposés aux ultraviolets. Un agent corrosif va creuser la couche d'oxyde aux endroits non protégés.
- Dopage : on dissout ensuite le vernis exposé avec un autre solvant, et des ions métalliques, appelés *dopants*, sont introduits dans le silicium exposé là où l'oxyde a été creusé, afin de le rendre conducteur.
- Couche suivante : l'opération est renouvelée pour créer les couches successives du circuit intégré ou du microprocesseur (jusqu'à 20).
- On détermine la qualité de la gravure selon le plus petit motif qu'il est possible de graver, en l'occurrence la largeur de la grille du transistor MOS. En 2004, les gravures les plus fines en production sont 0,13 μm (ou 130 nm) et 90 nm.

Phases finales

- On dépose une pellicule métallique aux endroits où le circuit devra être en contact avec les broches de sortie.
- Les circuits intégrés sont testés directement sur le wafer. Les puces défectueuses sont marquées.
- Le wafer est finalement découpé au diamant.
- Les puces ainsi obtenues sont insérées dans un boîtier individuel de protection et reliées aux broches qui vont leur permettre de communiquer avec l'extérieur.
- Des tests de validation sévères et individuels sont alors entrepris pour qualifier les microprocesseurs, en fréquence et en température.

6.8.4. Technologies spécialisées

Certaines techniques sont aussi utilisées pour des circuits intégrés de type un peu spécialisé.

6.8.4.1. Silicium sur isolant

La technologie (*silicon on insulator* - SOI) consiste à introduire une couche isolante électriquement sous les transistors en profondeur du silicium. Cela réduit les pertes d'électrons dans le circuit, sources de consommation statique d'énergie. Le silicium "à côté" des transistors n'est plus fixé à un potentiel donné, ce qui introduit des performances intéressantes (augmentation de vitesse pour les portes CMOS complexes).

6.8.4.2. Silicium sur saphir

Dans certains cas, le substrat en silicium monocristallin est purement et simplement abandonné. L'avantage intrinsèque d'utiliser du silicium (l'arrangement des atomes de silicium sur le substrat est naturellement plus régulier) peut alors être compensé pour des applications spécialisées. C'est ainsi que le *silicium sur saphir* (substrat en saphir cristallin) est utilisé dans les applications où le circuit intégré sera exploité dans un environnement spatial ou soumis à d'intenses radiations qui rendraient les substrats de silicium inutilisables.

6.8.4.3. Arséniure de gallium

On réalise également des semi-conducteurs à base d'arséniure de gallium. Même si ce matériau a eu l'antériorité sur le silicium, il avait quasiment disparu de l'industrie. Aujourd'hui les avantages intrinsèques de ce matériau en termes de vitesse de commutation lui redonnent une nouvelle jeunesse dans le domaine des hautes fréquences et l'on voit réapparaître une fabrication industrielle sur la base de cette technologie.

6.8.4.4. Développements futurs

L'industrie des circuits intégrés est une de celles qui évoluent le plus rapidement de l'histoire des technologies. Elle explore continuellement de nouvelles technologies. Parmi celles qui semblent avoir un avenir prometteur il faut compter :

- les substrats en diamant, dont on attend beaucoup en termes de refroidissement

6.8.5. Description des circuits intégrés

6.8.5.1. Types de boîtiers

Afin de les protéger et de faciliter leur utilisation, les circuits intégrés sont collés généralement dans des boîtiers pleins rectangulaires en plastique ou en céramique, en vue d'être placés sur des circuits imprimés ou d'autres supports adéquats. Ils sont équipés sur un ou plusieurs côtés voire sur une face, de broches/pattes/pins qui permettent d'établir les connexions avec les autres éléments du circuit électronique. Ces composants sont soudés (mode traversant ou en surface), ou bien enfilés dans des supports afin de faciliter les opérations de démontage, sur un circuit imprimé.

De nombreux types de boîtiers permettent d'adapter le circuit intégré à son environnement de destination.

- Le format le plus ancien a pour nom **DIP** (Dual In-Line Package) ou boîtier à double rangée de connexions.
- La miniaturisation aidant, les circuits dits de surfaces ont fait leur apparition. C'est le format **SO** (Small Out-Line) qui a lui-même de nombreuses déclinaisons.
- Il existe également d'autres types de boîtiers adaptés aux puces qui nécessitent de nombreuses connexions, comme certains microprocesseurs récents. Ils sont souvent insérés dans un boîtier de forme carrée et doté de broches sur toute sa surface PGA (Pin Grid Array), ou boîtier «fakir».

Les images ci-dessous illustrent quelques types de boîtiers de circuits intégrés (Fig 6.8.5).

- DIP (Dual In-Line Package)
- SO (Small Out-Line)
- PLCC (Pastic Leaded Chips Carrier)
- TSOP (Thin Small Out-Line Package)
- QFP (Quad Flat Package)
- BGA (Ball Grid Array)
- PQF (Plastic Quad Flat-Pack)

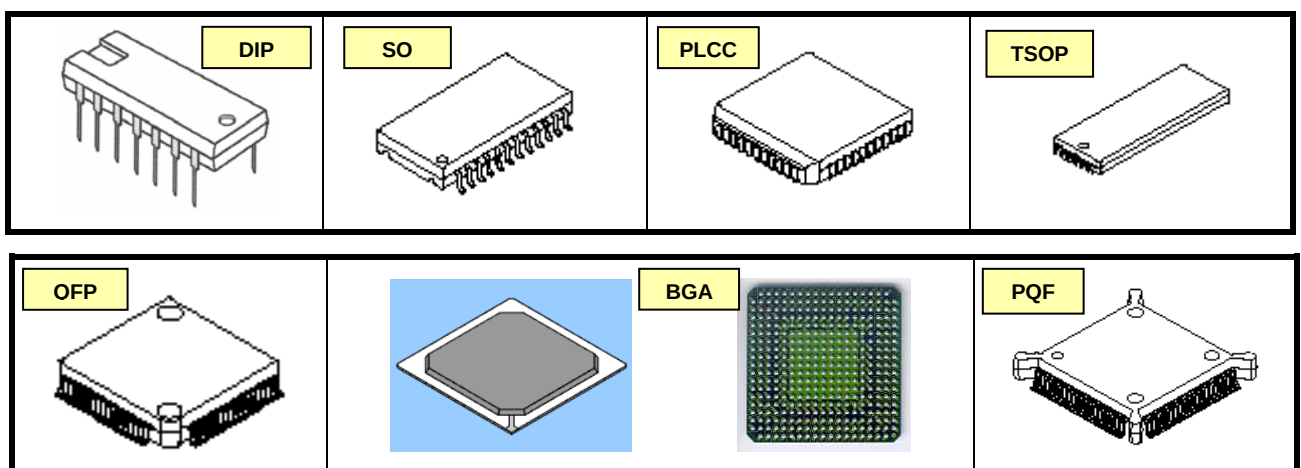


Fig. 6.8.5

6.8.5.2. Positionnement du composant sur un circuit imprimé

Afin de permettre le positionnement du composant sur le circuit imprimé, le boîtier comporte un repère à l'une de ses extrémités. Ce repère se présente généralement par une encoche soit en forme de demi-cercle, soit en forme de rectangle, ou bien c'est un point légèrement décalé vers la gauche.

La figure 6.8.6 ci-dessous montre un exemple de repérages rencontrés sur des boîtiers DIP 14 pattes.

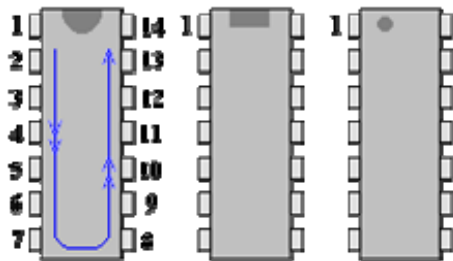


Fig. 6.8.6

Dans ce cas, lorsque l'on regarde la face du circuit intégré qui comporte les inscriptions, le repère étant à gauche, les broches sont repérées en commençant par la gauche de haut en bas puis en remontant sur la rangée droite de bas en haut (en suivant la flèche bleue sur le dessin).

6.8.5.3. Marquage des circuits intégrés

La face supérieure du boîtier d'un circuit intégré porte toujours un certain nombre d'inscriptions alphanumériques permettant d'identifier le nom du constructeur, la référence du composant, un code correspondant à des variantes ou révisions. Vous trouverez ci-après quelques renseignements permettant de déchiffrer plus facilement ces inscriptions.

En règle générale, on trouvera un marquage du style : PPXXXXSS, où :

- PP représente le préfixe, qui peut désigner le fabricant (son logo est souvent par ailleurs imprimé également sur la même face du composant) ou permettre d'identifier une version,
- XXXX est la référence du C.I. (*model*, en anglais),
- SS est un suffixe relatif au boîtier (D, FE, N...) ou à une version particulière du modèle.

Voici quelques préfixes et logos de fabricants : ST pour STMicroelectronics, NE pour Philips Semiconductors, LM pour National Semiconductors, SN pour Texas Instruments, HA pour Harris...



On trouvera des suffixes tels que C (pour *Ceramic Dual-in-Line Package*, ou CERDIP), E (pour *Plastic Dual-in-Line Package*, ou DIP)...

Les préfixes ou suffixes servent aussi à distinguer différentes versions d'un même circuit intégré; les différences portent en général sur quelques paramètres, notamment la température de fonctionnement (de 0 à 70 °C, de -40 à 85 °C...) ou encore la tension d'alimentation.

Une lettre ou un groupe de lettres renseigne parfois sur la famille technologique : C pour CMOS, HC pour High Speed CMOS, HCT pour High Speed CMOS TTL compatible, LS pour Low Power Schottky...

Enfin, en plus des références commerciales du composant, le boîtier comporte également le nom du pays où le composant a été fabriqué (Portugal, Singapore, Malaysia...), ainsi que la date de fabrication, sous la forme de quatre chiffres codés AASS : année et semaine (exemple : 9812 pour douzième semaine de 1998).

En pratique, on tâchera surtout de repérer la référence exacte, qui est l'information principale, puis on se reportera, au besoin, au catalogue ou à la fiche technique du fabricant pour d'éventuelles précisions sur telle ou telle version particulière, identifiée par un préfixe ou un suffixe.