

IV Circuits : une classification

Notre propos étant essentiellement de présenter les méthodes de synthèse des fonctions logiques, dans l'optique de leur réalisation au moyen de circuits programmables ou de circuits intégrés dédiés à une application, nous n'explorerons que très partiellement les fonctions standard.

Même si l'importance des quelques centaines de fonctions proposées dans un catalogue de circuits TTL a tendance à décroître, en valeur relative, elles restent une référence « culturelle », pour le moins. Aucun concepteur de système numérique ne peut tout ignorer du décodeur 74xx138, des compteurs et registres de la famille 74xx160, des multiplexeurs de la famille 74xx151 ou des interfaces de bus de la famille des 74xx240¹.

Nous tenterons de donner ici quelques repères de classification, renvoyant le lecteur aux nombreux ouvrages qui traitent le sujet pour un complément d'information.

Dans le monde des circuits configurables par l'utilisateur, technologies et architectures sont intimement liées. Nous adopterons ici un point de vue utilisateur, sans nous préoccuper du « comment cela fonctionne », au niveau des processus de fabrication.

IV.1. Des fonctions prédéfinies : les circuits standard

Outre les opérateurs élémentaires, portes et bascules, les circuits standard peuvent être classés par modes de fonctionnement :

- combinatoires ;
- séquentiels, synchrones ou asynchrones ;
- interfaces avec des bus trois états, collecteurs ouverts.

¹Ces derniers jouent plus un rôle électrique que logique. Ils gardent leur place dans les stocks de composants, à côté des circuits logiques proprement dits qui sont essentiellement des circuits programmables.

Parallèlement à cette première classification, on peut également établir un découpage par fonctions :

- aiguillages d'informations ;
- commandes ;
- arithmétique ;
- compteurs ;
- registres ;
- transcodeurs, encodeurs,
- et sans doute bien d'autres.

Les deux classifications sont corrélées, mais ne se recouvrent pas ; dans la figure IV-1 nous avons tenté d'illustrer les principaux de ces repères, en indiquant certains liens croisés entre les deux approches.

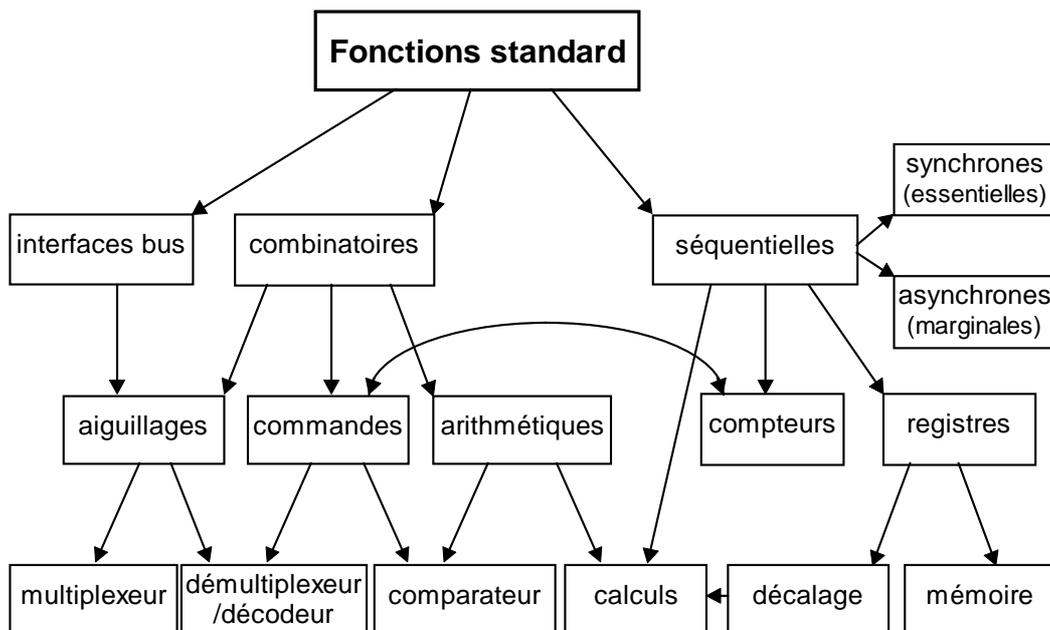


Figure IV-1

Nous passerons volontairement sous silence les fonctions arithmétiques, elles concernent des applications très spécialisée.

IV.1.1 Circuits combinatoires

Multiplexeurs et décodeurs font partie de la boîte à outil standard de toute conception logique. Leur fonction première concerne l'aiguillage d'une information ; au delà de cette application directe, ces opérateurs sont génériques, ils permettent de réaliser n'importe quelle fonction combinatoire, nous les retrouverons à ce titre dans les cellules élémentaires de certains circuits programmables.

Les multiplexeurs

L'image d'un multiplexeur correspond à la sortie d'une gare de triage : par un jeu d'aiguillages on peut raccorder l'une des voies de la gare à la ligne de sortie.

Principe général

Un multiplexeur possède deux types d'entrées :

- les données d'entrée dont l'une est aiguillée vers la sortie,
- les commandes de l'aiguillage qui spécifient laquelle des entrées doit se retrouver en sortie, ou, éventuellement, permettent d'inhiber globalement le fonctionnement du circuit (figure IV-2).

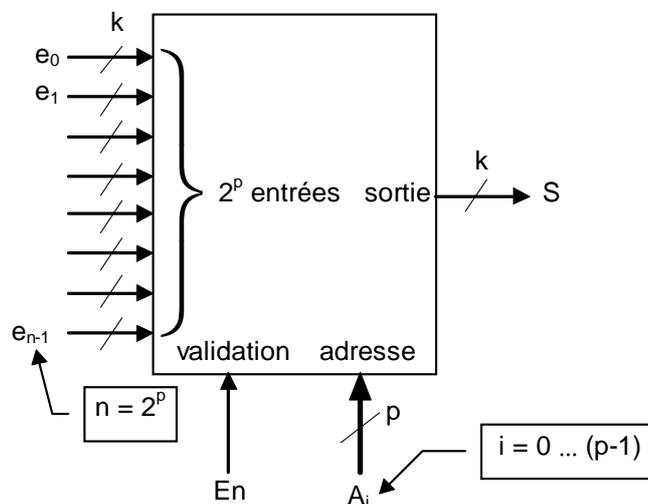


Figure IV-2

Le fonctionnement est le suivant :

- Si En est actif, mettons égal à '0', la sortie S est égale à l'entrée dont la commande d'adresse, A codée sur p bits, fournit le numéro ;

- si **En** est inactif, la sortie est à un niveau fixe, indépendant des entrées, mettons '1'.

De cette définition on peut tirer l'équation, pour $p = 2$:

$$S = \overline{E_n} * (\overline{A_1} * \overline{A_0} * e_0 + \overline{A_1} * A_0 * e_1 + A_1 * \overline{A_0} * e_2 + A_1 * A_0 * e_3)$$

Chaque entrée e_i peut être une donnée binaire, ou un mot codé sur un nombre k quelconque de bits.

Exemples

Les circuits classiques, de la famille TTL, correspondent à :

$$74xx151 : p = 3, n = 8, k = 1$$

$$74xx153 : p = 2, n = 4, k = 2$$

$$74xx157 : p = 1, n = 2, k = 4$$

Les variations corrélatives de n et k sont telles que tous ces circuits tiennent dans un boîtier 16 broches.

Opérateur générique

Un multiplexeur à p entrées d'adresses permet, en rajoutant éventuellement un inverseur, de générer n'importe quelle fonction de $p + 1$ variables d'entrée.

La solution est évidente : étant donné une fonction $f(x_p, x_{p-1}, \dots, x_0)$, pour une combinaison donnée des variables $x_{p-1} \dots x_0$, la fonction ne peut prendre que les valeurs $x_p, \overline{x_p}, '0'$ ou $'1'$. Il suffit donc de connecter les variables $x_{p-1} \dots x_0$ aux entrées d'adresses d'un multiplexeur dont les entrées de données sont connectées à $x_p, \overline{x_p}, '0'$ ou $'1'$, suivant la valeur de la fonction.

Les décodeurs – démultiplexeurs

Décodeur et démultiplexeur sont deux fonctions différentes, mais obéissent aux mêmes équations. Le circuit est donc le même, mais vu sous deux aspects différents.

La fonction décodeur

Un décodeur est un opérateur à sorties multiples, dont le nombre est généralement une puissance de deux, telles que dans une convention logique donnée (le plus souvent négative), une seule d'entre elles, au maximum, soit active à un instant donné. Des entrées d'adresse permettent de sélectionner celle des sorties qui doit être active, et des entrées de validation générale permettent d'inhiber toutes les sorties. L'exemple illustré par la figure IV-3 correspond au décodeur le plus utilisé de la famille TTL : le 74xx138.

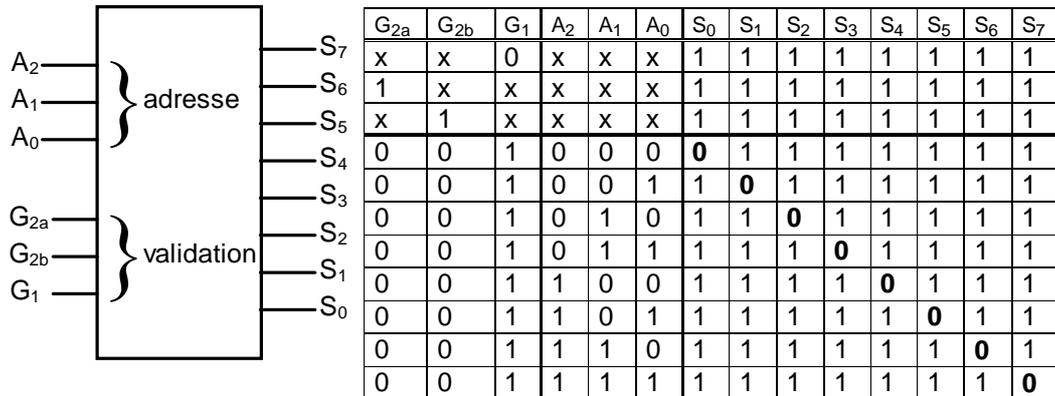


Figure IV-3

Contrairement à notre habitude, nous en reproduisons la table de vérité : la diagonale de '0', qui indique laquelle des sorties est active, est caractéristique de la fonction décodeur.

Application typique

L'application la plus fréquente des décodeurs est la commande de circuits trois états qui accèdent à un bus commun. Les différents boîtiers de mémoire qui constituent la mémoire centrale d'un ordinateur en est un exemple typique. Lors de l'écriture ou de la lecture d'une information en mémoire, un seul des boîtiers doit être activé, celui qui contient la cellule mémoire adressée (figure IV-4) :

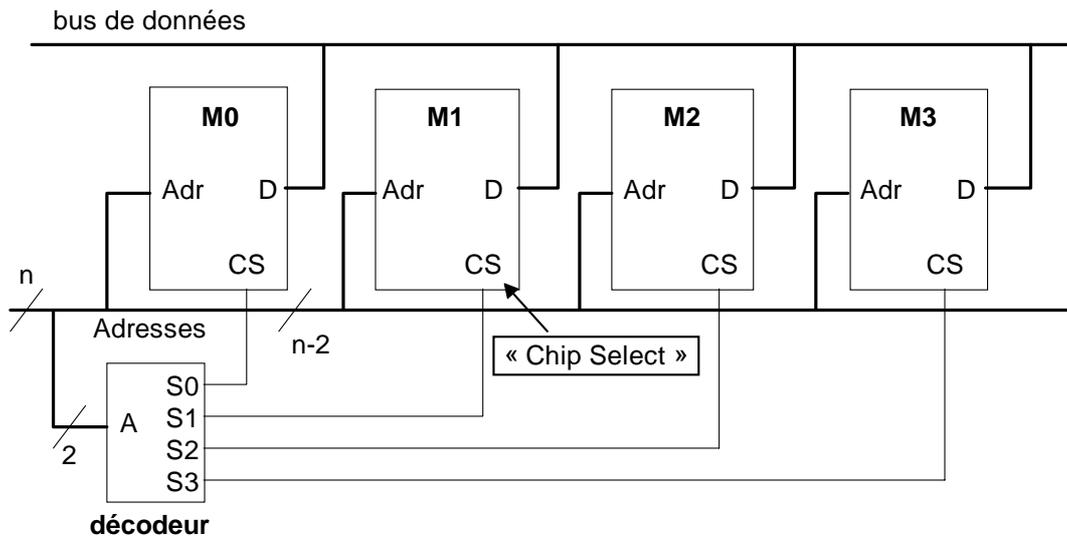


Figure IV-4

Les deux bits de poids forts de l'adresse sont utilisés pour sélectionner le boîtier, les autres bits adressent en parallèle tous les circuits de la mémoire. Nous n'avons pas représenté sur cette figure des commandes globales qui fixent, par exemple, le sens de transfert des données.

Génération de fonctions

Si on exprime, en logique positive, la relation entre les entrées d'adresse et une sortie d'un décodeur, l'équation obtenue est un simple produit logique. Les sorties sont généralement actives au niveau bas, ce qui rajoute une complémentation. Par exemple en admettant que les commandes de validation générale sont actives :

$$\overline{S5} = A2 * \overline{A1} * A0$$

Pour réaliser une fonction quelconque des entrées d'adresses, considérées comme des variables quelconques, il suffit de réunir les monômes correspondants :

$$\begin{aligned} f(A2,A1,A0) &= \overline{A2} * A1 * A0 + A2 * \overline{A1} * A0 + A2 * A1 * \overline{A0} \\ &= \overline{S3} * S5 * S6 \end{aligned}$$

Dans l'équation précédente, nous avons utilisé les lois de De Morgan pour passer d'une convention logique positive à la convention logique négative généralement utilisées dans les décodeurs.

Cette application des décodeurs est intéressante quand il est nécessaire de créer plusieurs fonctions des mêmes variables.

La fonction démultiplexeur

Le même circuit peut servir à réaliser l'opération réciproque² du multiplexage : le démultiplexage.

Un démultiplexeur est un opérateur qui aiguille une entrée de donnée vers une sortie dont on donne l'adresse sous forme d'un nombre codé en binaire. Pour réaliser une telle fonction avec un décodeur du type 74138, par exemple, il suffit de considérer l'une des entrées de validation comme entrée de donnée (G_{2a} ou G_{2b} si la sortie adressée doit avoir la même polarité que l'entrée).

IV.1.2 Circuits séquentiels

Nous nous contenterons, ici, de décrire deux fonctions séquentielles synchrones fondamentales : les compteurs programmables et les registres à décalage.

²Notons qu'il s'agit là d'un abus de langage, il ne s'agit pas de la fonction réciproque au sens mathématique du terme, ce qui n'aurait aucun sens. On peut, de même, considérer qu'un encodeur prioritaire, comme le 74148, est une forme de fonction réciproque du décodeur 74138 : c'est un opérateur à huit entrées qui fournit sur ses trois sorties le numéro, codé en binaire, de l'entrée active la plus prioritaire.

Les compteurs

La fonction de comptage élémentaire consiste simplement à passer d'une valeur entière N à la valeur $N + 1$ (ou $N - 1$ s'il s'agit d'un décompteur)³, quand un ordre de comptage est actif. Le nombre N est codé sur n chiffres binaires. Comme n est fini (4, 8 ou 16 sont des valeurs courantes), l'ensemble des valeurs possibles pour le contenu du compteur est fini. Quand N est égal au plus grand nombre possible, N_{\max} , la valeur suivante est généralement 0. Un compteur réel est donc toujours un compteur modulo $N_{\max} + 1$; si $N_{\max} = 2^n - 1$ il s'agit d'un compteur binaire, mais il existe des compteurs dans d'autres codes, par exemple les compteurs décimaux (code DCB).

Les compteurs programmables disposent d'entrées de commandes qui leur donnent bien d'autres fonctions que l'incréméntation d'un entier.

Principe de fonctionnement

Nous prendrons comme exemple les compteurs 4 bits TTL de la famille 74160 (74160, 74161, 74162, 74163, 74168 et 74169). Ce sont des circuits synchrones, dont l'évolution est provoquée par un front montant du signal d'horloge qui est commun à toutes les bascules du circuit. La figure IV-5 résume les caractéristiques d'un compteur 74163 :

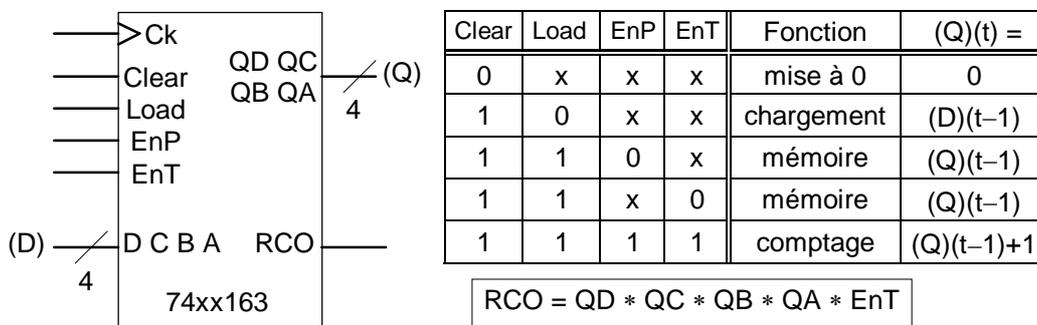


Figure IV-5

A chaque front montant d'horloge l'action précisée par le tableau a lieu. Par exemple : en mode chargement, des données présentes sur les entrées (D), notation globale pour les quatre données D, C, B et A, sont transférées dans les quatre bascules du compteur, QD, QC, QB et QA, notées collectivement (Q).

La sortie RCO (*Ripple carry output*) est active si le compteur a atteint sa valeur N_{\max} et s'il est autorisé à compter ; elle annonce le début d'un nouveau cycle pour la période d'horloge suivante. Cette sortie sert à la mise en cascade de

³Le symbole + représente ici l'opération d'addition.

plusieurs circuits du même type, de façon à réaliser un compteur sur plus de quatre chiffres binaires.

Le tableau ci-dessous résume les principales caractéristiques des différents membres de cette famille de compteurs :

Type	Caractéristiques particulières
74160	Décimal, remise à zéro asynchrone, chargement synchrone.
74161	Binaire, remise à zéro asynchrone, chargement synchrone.
74162	Décimal, remise à zéro synchrone, chargement synchrone.
74163	Binaire, remise à zéro synchrone, chargement synchrone.
74168	Décimal, compteur décompteur, pas de RAZ, chargement synchrone.
74169	Binaire, compteur décompteur, pas de RAZ, chargement synchrone.

Nous verrons un exemple d'application de ces compteurs au chapitre suivant.

Compteurs à plusieurs chiffres

L'association de plusieurs compteurs du même type ne nécessite, en général, aucun autre circuit que les compteurs eux-mêmes. Il suffit de chaîner les sorties RCO sur les entrées EnT, en allant des poids faibles vers les poids forts, pour qu'un étage ne s'incrémente que quand *tous* les étages précédents recommencent un nouveau cycle (figure IV-6) :

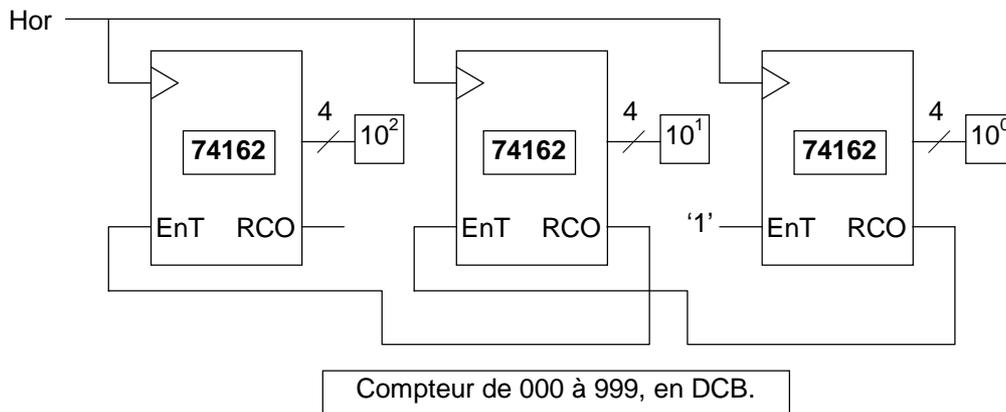


Figure IV-6

Sur le schéma de la figure IV-6, nous n'avons pas représenté les autres commandes des compteurs. Elles doivent être configurées de sorte que les trois décades soient en mode de comptage.

Dans le schéma précédent la retenue se *propage* de circuit en circuit, des poids faibles vers les poids forts. Ce mécanisme provoque un cumul des temps de propagation : pour que l'autorisation de comptage du dernier étage (poids le plus fort) soit stable, il faut attendre que toutes les retenues aient été calculées par les étages précédents. Pour des applications où la limitation correspondante de la fréquence d'horloge serait inacceptable, les retenues doivent être calculées en parallèle. Il existe des circuits spécialisés destinés à ce type d'applications, comme le 74xx264, connus sous le nom (trompeur) de générateurs de *retenue anticipée* (ces circuits n'anticipent évidemment pas, ils évitent le cumul des retards).

Les registres à décalage

Un registre à décalage élémentaire est organisé de telle façon que l'entrée d'une bascule est connectée à la sortie de l'une de ses voisines (figure IV-7) :

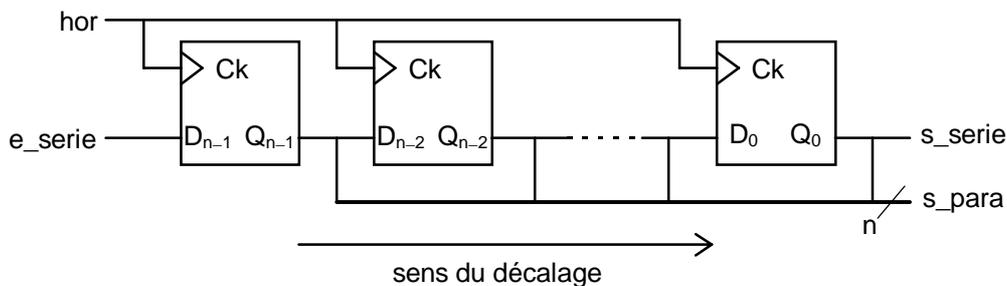


Figure IV-7

Suivant le sens du décalage, lié à la façon dont on dessine le schéma, on parle de décalage à gauche ou à droite.

Si le contenu du registre représente un nombre codé en binaire, nous retrouvons que la fonction décalage est intimement liée aux opérations de multiplication et de division par deux (voir chapitre I).

Registres universels

De même qu'un compteur offre généralement bien d'autres possibilités que le comptage, les registres à décalage universels offrent, grâce à un mot de commande, des fonctions supplémentaires :

- mémoire (le registre conserve son état initial),
- chargement parallèle,
- entrées sorties parallèles trois états,
- décalages à gauche et à droite (74xx323, par exemple),
- décalage arithmétique.

Précisons la dernière de ces fonctions : dans la division par deux d'un nombre entier signé, codé en complément à deux, le signe du nombre doit être conservé. Certains registres (74xx322, par exemple) offrent la possibilité de réaliser cette opération en interne, lors d'un décalage arithmétique l'entrée de la bascule de rang $n - 1$ est connectée à sa propre sortie, de sorte qu'au cours du décalage le signe du nombre soit conservé et propagé vers les poids faibles, comme il se doit.

Applications

Outre les opérations arithmétiques, les applications principales des registres à décalages concernent les transmissions d'informations binaires en *série*, c'est à dire élément binaire par élément binaire :

- liaisons séries entre ordinateurs,
- transmissions numériques par radio,
- lecture ou enregistrement de mémoires magnétiques, disques ou bandes,
- etc.

IV.1.3 Circuits d'interface

Alors que la plupart des fonctions standard apparaissent actuellement au concepteur plus comme des éléments de librairie (dans un système de CAO) que comme des composants réels à implanter sur une carte, les circuits d'interface (*bus drivers*, *line drivers* et *buffers*) restent des composants véritables très utilisés.

Leur fonction logique est généralement triviale : ils relient entre eux les signaux de deux systèmes, sans réaliser aucune opération, sauf parfois une simple inversion. Leur particularité réside dans leurs caractéristiques électriques qui sont adaptées à leur destination : commander de nombreuses entrées, éventuellement à travers des connexions de grande longueur et recevoir des signaux éventuellement entachés de parasites. Les caractéristiques électriques qui les distinguent des opérateurs traditionnels sont les suivantes :

- Leur sortance est plus élevée que celle des opérateurs classiques de la même famille technologique (typiquement trois fois plus).
- Ils sont capables de fournir des « pics » de courant de forte amplitude lors des commutations (au moins 30 mA, typiquement 60mA, pour un 74ALS245, par exemple).
- Leur résistance équivalente de sortie est contrôlée (quelques dizaines d'ohms), de façon à limiter les phénomènes de réflexions multiples sur les extrémités des lignes d'interconnexion.
- Les sorties trois états se mettent en haute impédance quand l'alimentation du circuit est coupée. Cette particularité autorise le raccordement d'une carte à un bus sans éteindre l'alimentation de tout le système.
- Certains de ces circuits (74xx244, par exemple) disposent d'un étage d'entrée qui présente un hystérésis (*trigger de Schmitt*). Cette propriété leur permet d'accepter en entrée des signaux qui varient lentement sans qu'il y ait cependant d'ambiguïté au moment de la commutation.

IV.2. Des fonctions définies par l'utilisateur

Deux grandes catégories de circuits offrent à l'utilisateur la possibilité de créer ses propres fonctions : les circuits programmables (*PLDs* et *FPGAs*) et les circuits intégrés spécifiques d'une application (*ASICs*)⁴. Les premiers sont programmables par le concepteur du système ; les seconds nécessitent l'intervention d'un fabricant de circuits (le *fondeur*).

Les *circuits programmables* : ils offrent, au prix d'une densité d'intégration plus faible (quelques dizaines de milliers de portes, au maximum, en 1995), une grande souplesse d'utilisation, un délai de mise en oeuvre très faible pour des petites séries et, pour certains d'entre eux, la possibilité de reprogrammer le circuit. Cette possibilité de reprogrammation peut aller jusqu'à la programmation *in situ*, c'est à dire sans retirer le circuit de la carte sur laquelle il est câblé. Cette technique ouvre la voie à la réalisation d'ensembles logiques reconfigurables suivant le contexte (cartes graphiques de micro-ordinateurs, par exemple) : le système hôte – un ordinateur le plus souvent – peut modifier la fonction d'un circuit en lui transmettant les nouvelles « équations » à réaliser.

Les *circuits spécifiques* : quant à eux, ils offrent une densité d'intégration très grande (jusqu'à quelques centaines de milliers de portes en 1995), au prix d'un délai initial de fabrication non négligeable et de l'impossibilité de modifier la fonction des circuits réalisés. Compte tenu du coût que représente la mise en fabrication d'un circuit, on les rencontre dans les produits de grande série (électronique grand public, automobile, électroménager, radio-téléphones, etc).

La figure IV-8 fournit une illustration des domaines d'application respectifs des circuits « standard », « programmables » et « spécifiques ». En abscisse figure le volume de production de la fonction réalisée, en ordonnée sa complexité.

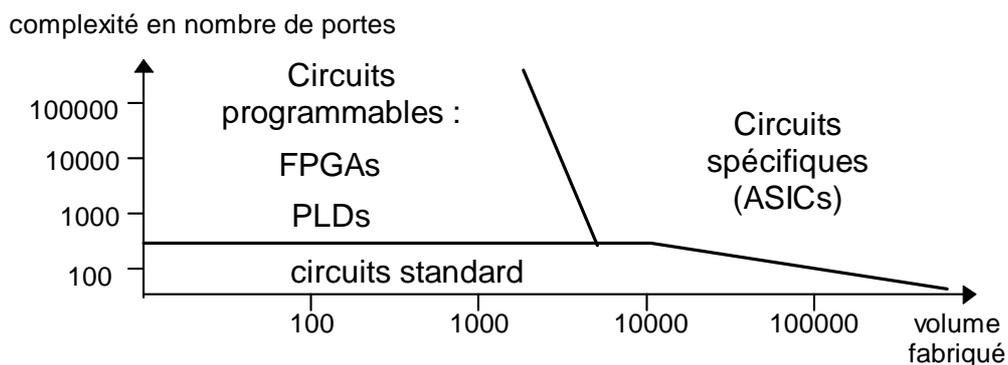


Figure IV-8

⁴PLD : Programmable Logic Device ; FPGA : Field Programmable Gate Array ; ASIC : Application Specific Integrated Circuit.

une croissance annuelle de la production de plus de 30% par an en volume. Le lecteur curieux est invité à consulter les *data books* des fabricants de circuits pour une plus ample information.

Complexité

La complexité d'un circuit programmable est généralement exprimée en nombre de portes équivalentes, en nombre de bascules disponibles et en nombre de cellules d'entrées sorties (reliées à une broche du circuit).

Ces chiffres doivent être examinés avec prudence, surtout le premier : les « gros » circuits actuels (2005) contiennent jusqu'à 2 000 000 de portes, mais lors de la programmation du circuit certaines de ces portes seront inutilisées. Les opérateurs logiques du circuit sont regroupés en cellules de quelques portes élémentaires, or un opérateur inutilisé dans une cellule ne peut pas être « récupéré » par une autre. Un déchet est donc inévitable. Schématiquement on peut dire que des cellules de petite taille limitent ce déchet, mais compliquent le réseau d'interconnexions, dont la place occupée sur le circuit augmente.

En ordre de grandeur, la plupart des constructeurs admettent un taux moyen d'utilisation des portes de un tiers, ce qui conduit à un nombre de portes utilisables qui peut aller jusqu'à quinze à vingt mille dans le cas ci-dessus.

Le nombre de bascules disponibles va de 8 pour les plus simples (PLD PAL16V8) à plus de 25 000 pour les plus complexes (FPGA Xilinx, Altera ou Actel). Pour les mêmes circuits, le nombre d'entrées sorties disponibles va de 16 à plusieurs centaines.

Programmables une fois ou reprogrammables

La programmation d'un circuit consiste à établir des interconnexions entre des opérateurs logiques. Les technologies employées pour les mémoires ont servi à mettre au point celles des circuits programmables : fusibles (*PROM*), transistors mos à grille flottante qui autorisent des structures effaçables grâce aux rayons ultraviolets (*EPROM*) ou électriquement (*EEPROM* ou *FLASH*). Dans le domaine des circuits simples et moyennement complexes, cette dernière technologie est celle qui domine.

D'autre part des technologies spécifiques aux circuits programmables sont apparues : transistors d'interconnexions commandés par le contenu d'une mémoire *RAM* statique, pour les circuits reconfigurables *in situ* ; anti-fusibles pour les circuits complexes programmables une fois. Les premiers (*in situ*) exécutent automatiquement une séquence d'initialisation après la mise sous tension, en allant chercher leur « table des fusibles » dans une mémoire *ROM* externe ou en dialoguant avec un système à microprocesseur. Dans les seconds (anti-fusibles), la programmation consiste à créer une surtension entre les bornes des contacts isolés que l'on veut réunir, surtension qui provoque le perçage du diélectrique et une véritable soudure par points.

Vitesse et consommation

Les circuits programmables n'échappent évidemment pas au compromis vitesse-consommation, commun à tous les circuits électroniques. La technologie utilisée étant généralement à base de cellules CMOS, la consommation est, en gros, proportionnelle à la fréquence de travail.

Contentons nous de citer quelques ordres de grandeur :

- Un PAL22V10 (10 bascules) rapide, 166 Mhz de fréquence maximum d'horloge, consomme jusqu'à 190 mA.
- Un compteur 16 bits à chargement parallèle, implanté dans un FPGA, cadencé à 100 Mhz consomme typiquement 50 mA.

Repères croisés

Toutes les technologies d'interconnexions ne sont pas disponibles avec toutes les complexités. Le tableau ci dessous résume ces corrélations.

Technologie	Types de circuits	Avantages	Inconvénients	Fabricants principaux
Fusibles	PLDs simples 10 bascules	rapidité	programmables une fois	tous
EPROM	PLDs simples et complexes < 250 bascules	reprogrammables après effacement aux ultra-violets	boitiers chers (fenêtre optique)	tous
FLASH	PLDs simples et complexes FPGAs < 400 bascules	reprogrammables électriquement	nécessitent un programmeur	tous AMD
SRAMS	des PLDs simples aux FPGAs complexes	reconfigurables in situ	circuits annexes et procédure d'initialisation	XILINX ALTERA ATMEL
Anti fusibles	FPGAs complexes	rapidité	programmables une fois	CYPRESS ACTEL QUICK LOGIC TEXAS INS.

IV.2.2 Les circuits spécifiques

Réservés aux grandes séries, les circuits spécifiques nécessitent l'intervention du fabricant pour réaliser la fonction définie par le concepteur de l'application. On distingue classiquement :

- Les circuits prédiffusés, dans lesquels les opérateurs logiques sont en place indépendamment de l'application. Seule la dernière couche d'interconnexions est modifiée par le fabricant, suivant la fonction à réaliser.
- Les circuits précaractérisés, pour lesquels les cellules sont placées et interconnectées à la demande.