

Chapitre IV : Systèmes logiques séquentiels

I- Introduction

Dans un système combinatoire les sorties ne dépendent que des valeurs des grandeurs d'entrées au même instant.

Dans la pratique nous avons à faire à des systèmes dans lesquels la sortie est simultanément fonction des états d'entrées présents et passés. Ce sont les machines séquentielles.

Un circuit séquentiel est un circuit dont l'état des sorties dépend non seulement des entrées mais également de l'état antérieur des sorties. Ces circuits doivent donc être capables de mémoriser une information.

Exemples : Compteurs, registre, générateurs de fonctions, détecteurs de séquences...etc.

Les fonctions séquentielles de base sont :

- La mémorisation.
- Le comptage.
- Le décalage.

Les circuits séquentiels fondamentaux sont :

- Les bascules.
- Les compteurs.
- Les registres.
- Les circuits mémoires comme la RAM (Random Access Memory).

Ces circuits peuvent travailler soit en mode synchrone, soit en mode asynchrone :

- Mode asynchrone : À tout moment, les signaux d'entrée peuvent provoquer le changement d'état des sorties (après un certain retard qu'on appelle «temps de réponse»). Ces systèmes sont difficiles à concevoir et à dépanner.

- Mode synchrone : Le moment exact où les sorties peuvent changer d'état est commandé par un signal d'horloge (train d'ondes carrées ou rectangulaires). Les changements d'état s'effectuent tous pendant une transition appelée « front » (montant ou descendant).

La majorité des systèmes numériques séquentiels sont synchrones même si certaines parties peuvent être asynchrones. Les avantages principaux du mode synchrone sont :

- Préparer les entrées sans perturber les sorties.
- Protéger des parasites survenant en entrée.

Les bascules que l'on peut considérer comme des mémoires élémentaires, sont les briques de base des circuits séquentiels.

Ce sont les circuits de mémorisation les plus répandus dans les systèmes numériques en raison de leur rapidité de fonctionnement, de la facilité d'écriture et de lecture d'information, et de la grande simplicité de leur interconnexion avec des portes logiques.

On trouve deux grandes familles de bascules :

- **Bascules de mémorisation** : elles possèdent les commandes de mise à zéro, mise à un, mémorisation.
- **Bascules de comptage** : elles possèdent en outre une commande de changement d'état.

II- Bascule bistable

II-1 Définition

Les bascules logiques sont les éléments les plus simples qui constituent les mémoires. Les mémoires sont réalisées par des opérateurs logiques qui peuvent stocker une information jusqu'à ce que cette information soit effacée par une autre information. L'opération de stockage d'information s'appelle "SET" (Mise à un) l'opération d'effacement s'appelle "RESET" (Mise à zéro). Ces opérateurs peuvent être électriques, électroniques, pneumatiques...

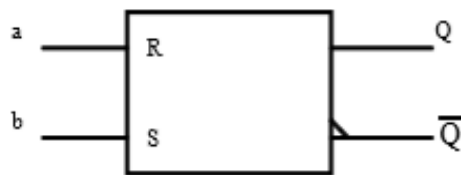
II-4 Bascule RS

a) La bascule RS asynchrone

La bascule R-S constitue le point mémoire de base. Elle comporte deux entrées R et S et deux sorties Q et \bar{Q} . \bar{Q} étant toujours le complément de Q . Les lettres R et S proviennent des initiales de deux mots anglo-saxons :

- **R** signifiant **Reset** qui veut dire remplacer (dans l'état initial).
- **S** signifiant **Set** qui veut dire placer (dans un état).

☞ **Symbole :**



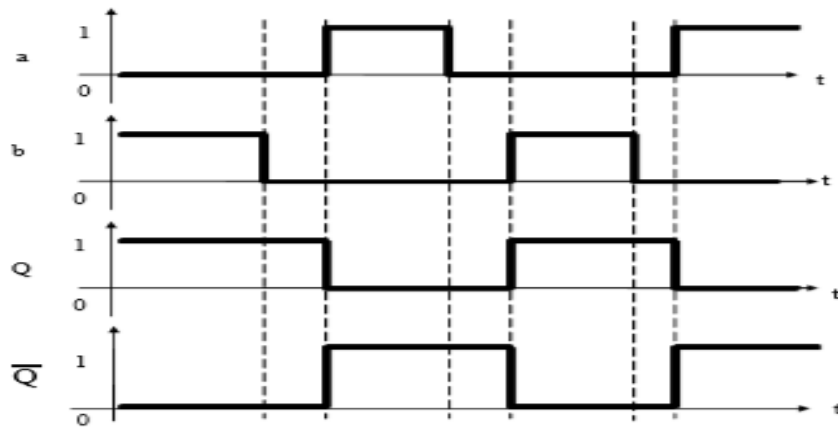
☞ **Table de vérité :**

Entrée	Entrée	Sortie	Sortie
R	S	Q_N	\bar{Q}_N
0	0	Q_{N-1}	\bar{Q}_{N-1}
0	1	1	0
1	0	0	1
1	1	?	?

- ✓ Le cas $R = 0$ et $S = 0$ correspond à la mémorisation de l'information. La sortie ne change pas d'état par rapport au précédent $Q_n = Q_{n-1}$.
- ✓ L'entrée S permet de fixer la sortie à "1".
- ✓ L'entrée R permet de fixer la sortie à "0".

⊗ **Remarque :** L'application de $S=1$ et $R=1$ est un cas indéterminé, qu'il est interdit d'utiliser dans les applications.

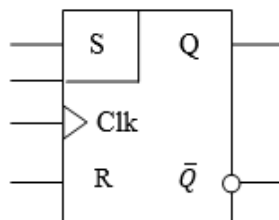
☞ Chronogrammes



b) La bascule RS synchrone

La bascule RSH est une bascule RS synchronisée par un signal d'horloge H. Lorsque H est au niveau bas, la bascule fonctionne comme une mémoire, et lorsque H est au niveau haut, la bascule fonctionne comme une bascule RS classique, et conserve donc les états interdits pour $R=S=1$.

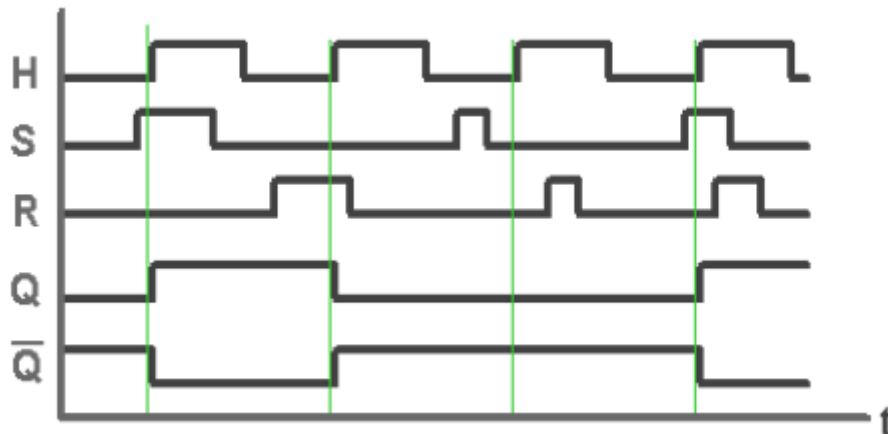
☞ Symbole



☞ Table de vérité

S	R	H	Q_{N+1}
X	X	0	Q_N
0	0	1	Q_N
0	1	1	0
1	0	1	1
1	1	X	X

☞ Chronogrammes



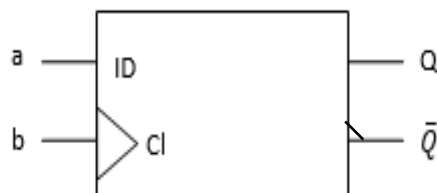
L'avantage de la bascule RSH par rapport à la bascule RS est sa sensibilité moindre aux parasites. Comme la bascule n'est sensible au bruit que lorsque l'horloge est au niveau haut, plus les états hauts de l'horloge seront brefs, moins la bascule sera sensible.

II-3 Bascule D

La bascule D est une bascule synchrone (avec une entrée d'horloge) à une seule entrée de donnée : l'entrée D (D=Data=Donnée). Elle supprime la combinaison interdite de la bascule RS, en ne gardant que les 3 fonctions utiles :

- ✓ La mise à 0
- ✓ La mise à 1
- ✓ La mémorisation

☞ Symbole :





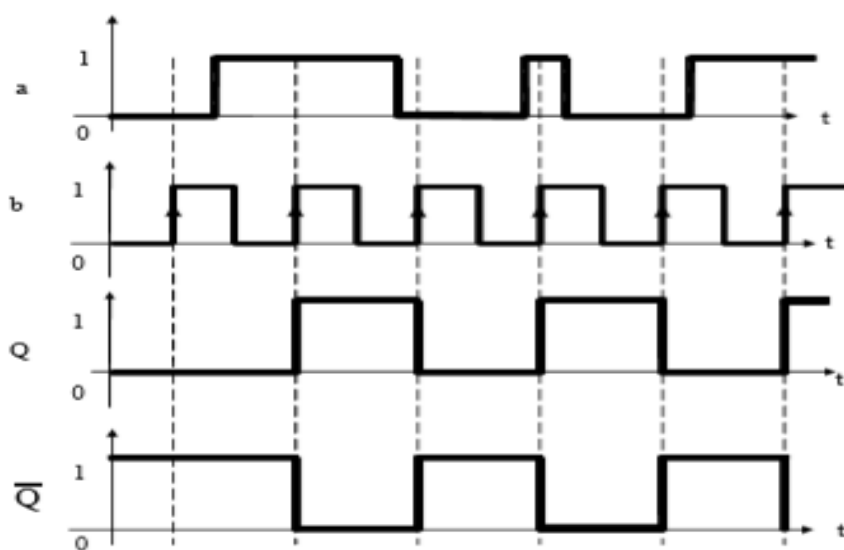
Remarque : ce symbole signifie que l'entrée est dynamique et qu'elle est activée sur une transition montante 0 → 1

☞ Table de vérité :

Entrée	Entrée	Sortie	Sortie
D	C	Q_N	\bar{Q}_N
A	b		
X	↓	Q_{N-1}	\bar{Q}_{N-1}
1	↑	1	0
0	↑	0	1

La sortie Q prend l'information a présente en D au moment de l'apparition d'un front montant sur l'entrée C (b passe de 0 à 1) et seulement à cet instant. Le reste du temps Q garde l'information en mémoire jusqu'au prochain front montant sur C.

☞ Chronogrammes



II-4 Verrou D (Latch D ou transparent Latch)

☞ Symbole



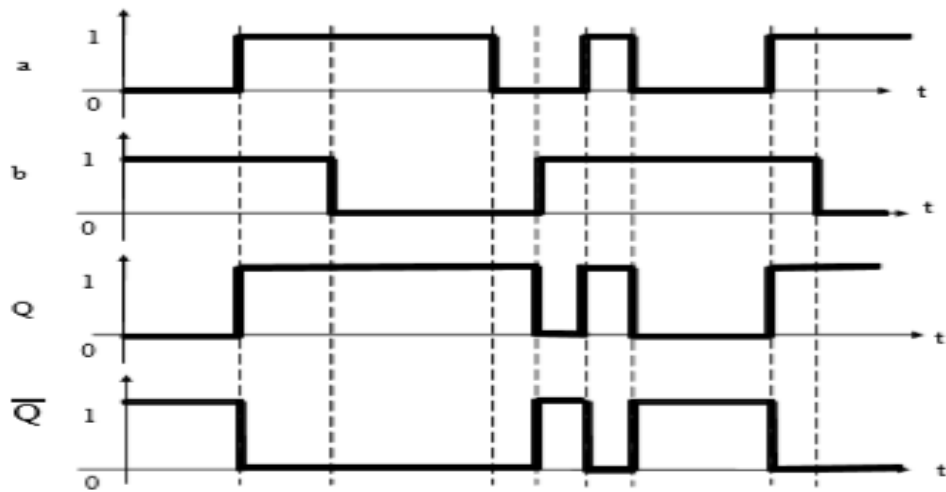
a et b sont des variables d'entrées, C est une entrée de synchronisation (entrée d'horloge). Elle permet de synchroniser le fonctionnement du verrou D.

☞ Table de vérité :

Entrée	Entrée	Sortie	Sortie
D	C	Q_N	\bar{Q}_N
A	b		
0	0	Q_{N-1}	\bar{Q}_{N-1}
1	0	Q_{N-1}	\bar{Q}_{N-1}
0	1	0	1
1	1	1	0

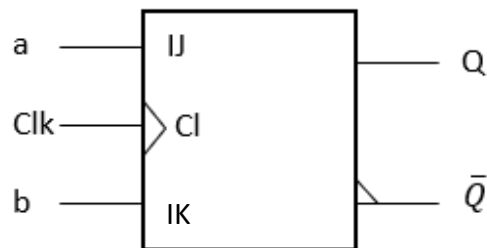
La sortie Q suit l'information présente sur l'entrée D tant que l'entrée C est au niveau logique haut. Quand l'entrée d'horloge C est à l'état logique "0", la sortie Q garde en mémoire le niveau logique que possédait D au moment de la transition de C de "1" vers "0" et ceci jusqu'à ce que C prenne à nouveau la valeur "1".

☞ Chronogrammes



II-5 Bascule JK

☞ Symbole

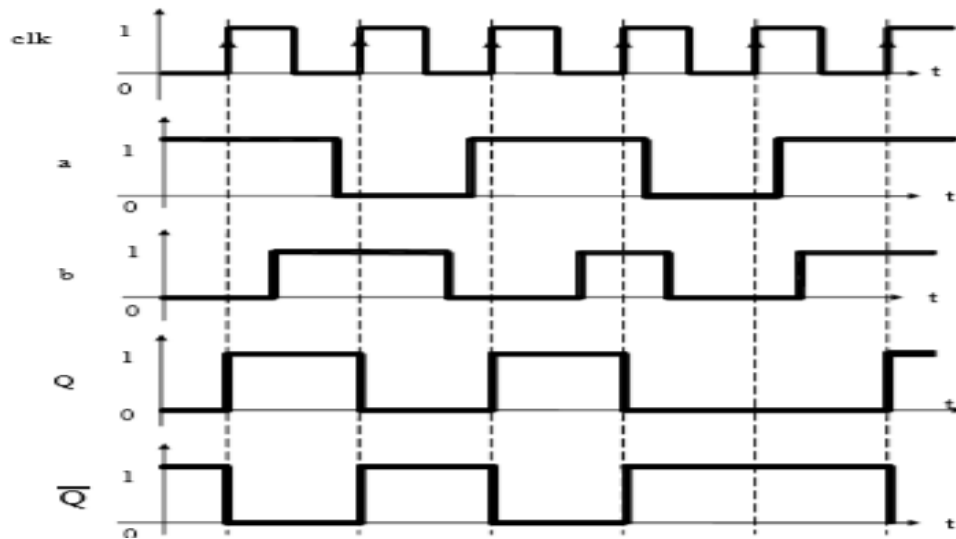


Remarque : les entrées J et K sont des entrées normalisées et synchrones avec celle de C.

☞ Table de vérité

Entrée	Entrée	Entrée	Sortie	Sortie	Fonctionnement
J	K	C	Q_N	\overline{Q}_N	
a	b	CLK			
X	X	↓	Q_{N-1}	\overline{Q}_{N-1}	Mémoire
0	0	↑	Q_{N-1}	\overline{Q}_{N-1}	Mémoire
1	0	↑	1	0	Set
0	1	↑	0	1	Reset
1	1	↑	\overline{Q}_{N-1}	Q_{N-1}	Toggle

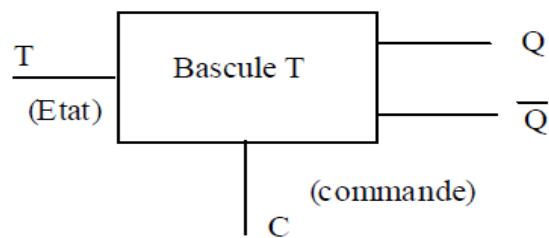
☞ Chronogrammes



II-3 Bascule T

La bascule T est un diviseur de fréquence par 2 : la sortie Q change à chaque front (montant ou descendant suivant les modèles) de l'entrée T.

☞ Symbole



- La bascule T change d'état si $T=1$ et ne change pas d'état si $T=0$. La Table suivante résume son fonctionnement.

❖ Table de vérité

T	H	Q_N	\bar{Q}_N	Remarque
1	↗	\bar{Q}_{N-1}	Q_{N-1}	Basculement
1	↘	Q_{N-1}	\bar{Q}_{N-1}	Mémorisation
0	↗ ↘	Q_{N-1}	\bar{Q}_{N-1}	Mémorisation

La bascule T tire son nom du terme anglais 'toggle'. Si son entrée T est active, elle bascule à chaque impulsion d'horloge d'où son nom. Si son entrée T est inactive, elle conserve son état.

Elle n'existe pas intégrée sauf dans des PLD, FPGA... mais on peut la fabriquer avec une bascule D en reliant la sortie non Q à l'entrée D (toutefois on ne réalise ainsi qu'une bascule T avec $T=1$), ou à l'aide d'une bascule JK en reliant J et K pour faire l'entrée T.

Comme la bascule T a la propriété de basculer à chaque impulsion d'horloge, elle réalise donc une division de fréquence par 2 ; elle servira aussi de base à la réalisation de compteurs (association simple si actives au front descendant de l'horloge). Intégrée dans un circuit, elle est souvent active sur un front descendant.

- Si $T=1$, on bascule à chaque impulsion d'horloge.
- Si $T=0$, la sortie ne change pas : état mémoire.

III- Compteurs

III-1 Compteurs et Décompteurs :

Les compteurs et/ou décompteurs sont constitués d'un agencement interne de bascules et d'opérateurs logiques qui, selon leur câblage, permet de réaliser un comptage et/ou un décomptage. Selon le type de compteur/décompteur désiré cet agencement diffère.

Il existe :

- Deux types de comptage/décomptage : BINAIRE ou DECIMAL.
- Deux modes de comptage/décomptage : SYNCHRONES ou ASYNCHRONES.

III-2 Compteurs binaires

Un compteur est dit "compteur binaire" lorsque le compteur effectue un comptage binaire, c'est à dire que l'ensemble des états logiques que peuvent prendre les sorties du compteur forme des mots ou des nombres binaires 11001101.

❖ **Exemple** : Si un compteur possède 4 sorties Q_a , Q_b , Q_c et Q_d , le nombre de code possible sera $2^4 = 16$.

Le compteur peut compter jusqu'à 15 : 0, 1, 2, 3, ..., 15.

III-3 Compteurs décimaux (compteur BCD)

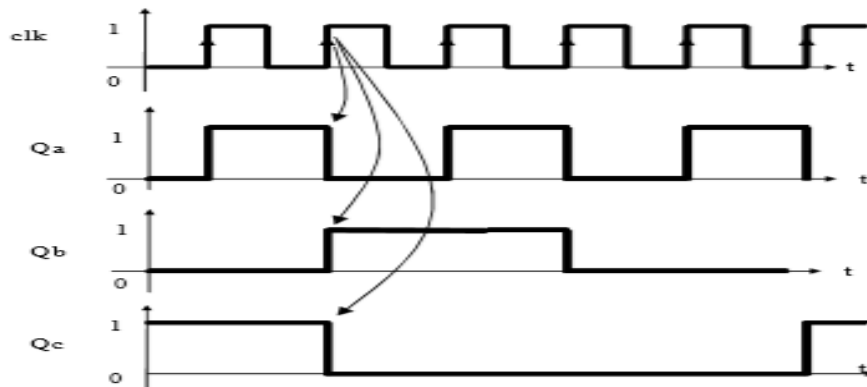
Un compteur est dit "compteur décimal" ou "compteur BCD" lorsque le nombre de mots binaires possibles fournis par ses sorties est au plus de dix, cela signifie que le compteur ne pourra compter au-delà de la valeur 9, et donc la prochaine valeur correspondra à la valeur de départ 0.

Un compteur décimal possède 4 sorties binaires Q_a , Q_b , Q_c et Q_d comme un compteur binaire. Mais le nombre de codes possibles en sortie ne sera que de 10, du code 0000_{bin}=0_{déc} au code 1001_{bin}=9_{déc}.

❖ Mode synchrone :

Un "Compteur Synchrone" signifie que les bascules qui composent le compteur sont synchronisées par le même signal (signal d'horloge) et donc "basculent" au même instant. Par conséquent le changement d'état des différentes sorties (Q_a , Q_b , ..., Q_n) que composent le compteur ne peut s'effectuer qu'à des instants identiques.

☞ Chronogrammes



☞ Avantages :

Toutes les bascules commutent en même temps

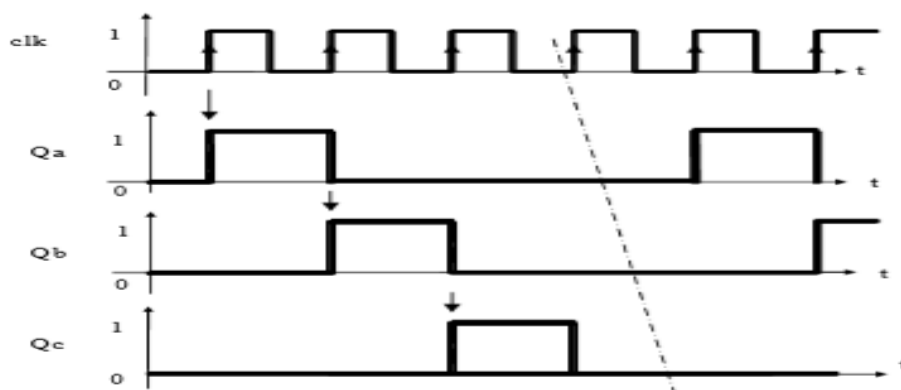
☞ Inconvénients :

Montage compliqué pour prévoir les états.

❖ Mode Asynchrone

Un "Compteur Asynchrone" signifie que les "bascullements" des bascules du compteur s'effectuent les uns après les autres. Le changement d'état de la sortie d'une bascule autorisera le changement d'état de la sortie de la bascule suivante et ainsi de suite. C'est un fonctionnement dit en cascade. La conséquence de ce type de fonctionnement est que le changement d'état des sorties du compteur ne s'effectue pas à des instants réguliers.

☞ Chronogrammes



☞ **Avantages :**

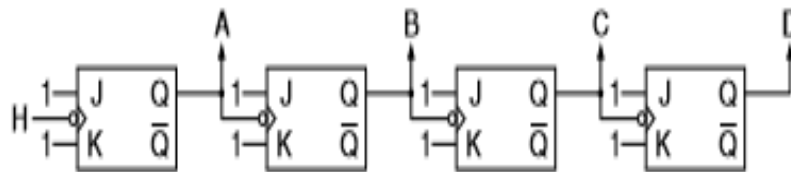
Montage simple.

☞ **Inconvénients :**

A cause des décalages temporels, ne va pas haut en fréquence.

III-4 Compteur asynchrone à cycle régulier

Réalisation à l'aide de bascules JK



La sortie de chaque bascule agit comme le signal d'horloge de la suivante.

✓ **Fonctionnement**

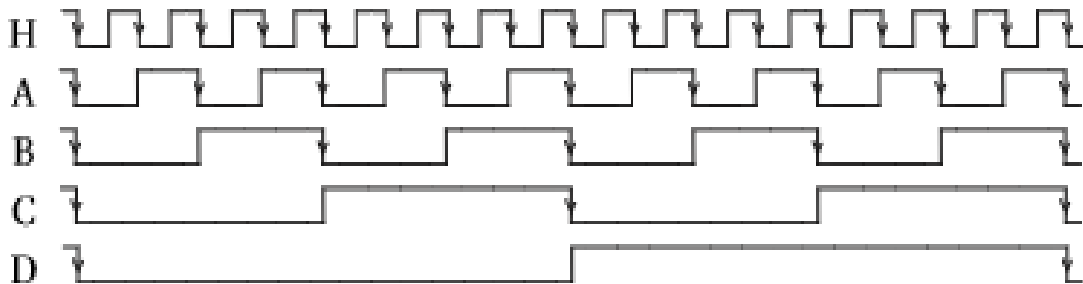
- $J=K=1$: toutes les bascules commutent sur des fronts descendants.
- La bascule A commute à chaque front descendant du signal d'horloge.
- la sortie de la bascule 1 sert d'horloge pour la bascule 2 \rightarrow B commute chaque fois que A passe de 1 à 0.
- De la même manière, C commute lorsque B passe de 1 à 0, et D commute lorsque C passe de 1 à 0.

N°	D	C	B	A
0	0	0	0	0
1	0	0	0	1
2	0	0	1	0
3	0	0	1	1
4	0	1	0	0
5	0	1	0	1
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
15	1	1	1	1
16	0	0	0	0
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

Si on imagine que DCBA représente un nombre binaire, le compteur réalise la suite des nombres binaires allant de 0000 à 1111 (soit de 0 à 15).

Après la 15ème impulsion, les bascules sont dans la condition 1111. Quand la 16ème impulsion arrive, le compteur affiche 0000 : un nouveau cycle commence

☞ Chronogramme

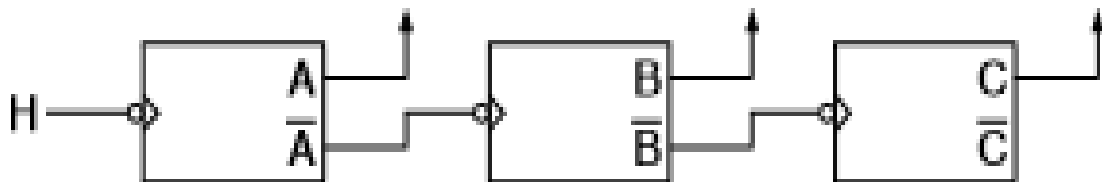


✓ Modulo

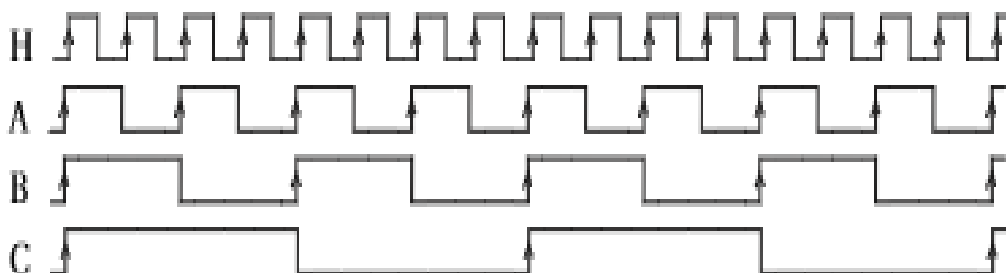
- C'est le nombre d'état occupés par le compteur pendant un cycle complet.
- Le modulo maximal d'un compteur à n bits (n bascules) est 2^n .
- Ex : compteur4bits \rightarrow 16 états distincts \rightarrow modulo16.

III-5 Décompteurs asynchrones

Il suffit de piloter chaque entrée CLK des bascules au moyen de la sortie complémentée de la bascule précédente. On obtient ainsi un décompteur.



☞ Chronogramme :



III-6 Compteur asynchrone à modulo $N < 2^n$ (à cycle régulier)

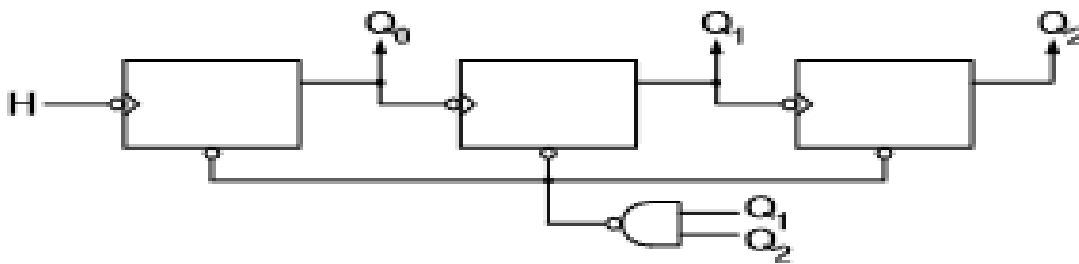
☞ Méthode

Pour réaliser un compteur ou un décompteur dont le cycle n'est pas une puissance de 2, la seule solution est d'agir sur l'entrée « Clear » lorsque la combinaison correspondant au modulo du compteur se produit sur les sorties de celui-ci.

Ainsi, pour $2^{n-1} < N < 2^n$, on réalise un compteur modulo 2^n (avec n bascules), puis on raccourcit le cycle en jouant sur les entrées RAZ des bascules.

☞ Exemple

Compteur asynchrone modulo 6 : $2^2 < 6 < 2^3 \rightarrow$ on réalise un compteur modulo 8 avec 3 bascules, et on ramène le compteur à 000 dès que $Q_2 Q_1 Q_0 = 110$. \rightarrow dès que la sortie de la porte NAND passe à 0, les bascules sont forcées à 0 : le compteur se remet à compter à partir de 0. \Rightarrow le compteur réalisé compte de 000 à 101 (de 0 à 5) puis recommence un nouveau cycle \rightarrow modulo 6. Voici le schéma du compteur modulo 6:



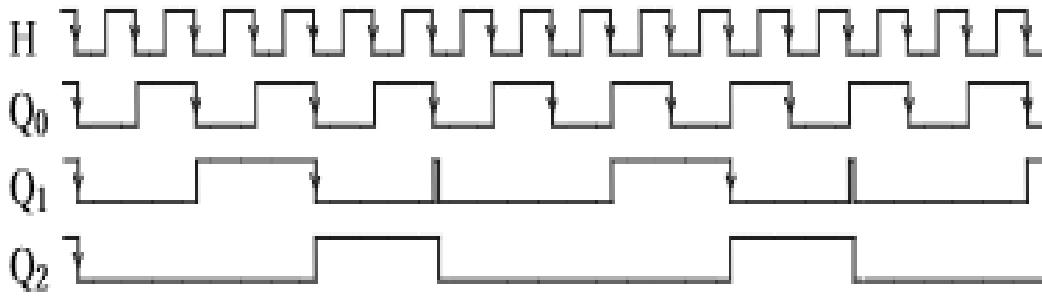
☞ Table d'implication séquentielle

N°	Q ₂	Q ₁	Q ₀
0	0	0	0
1	0	0	1
2	0	1	0
3	0	1	1
4	1	0	0
5	1	0	1
6	1	1	0

\rightarrow 0 0 0

$Q_2 Q_1 Q_0 = 110$ est un état temporaire. Il existe mais pendant une durée très courte. C'est un état indésirable.

☞ Chronogramme



IV- Registres

Un registre est un ensemble de bascules, synchronisées par la même horloge. Les registres sont à la base des opérations couramment utilisées dans les ordinateurs à mémorisation provisoire (mémoires-tampon), décalages, rotations, etc.

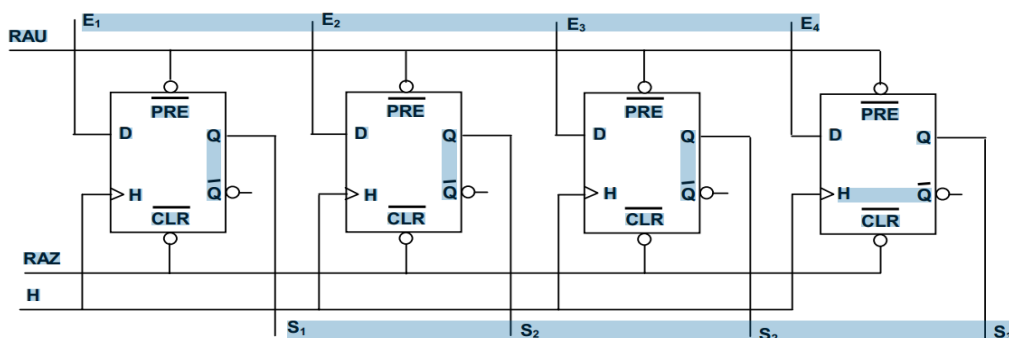
IV-1 Différents types de registres

On distingue quatre types de registres selon la façon dont sont utilisées les entrées et les sorties : en parallèle ou en série.

a) Registres à entrées parallèles, sorties parallèles

Toutes les entrées (E₁, E₂, E₃, E₄) sont introduites en même temps dans le registre. Toutes les sorties (S₁, S₂, S₃, S₄) sont disponibles au même instant. Les signaux RAZ et RAU sont des entrées asynchrones permettant respectivement la remise à zéro ou la remise à un de toutes les bascules en même temps.

On considère un registre de quatre bits. Les bascules utilisées dans les exemples suivants sont des bascules D mais un registre peut également être réalisé à partir de bascules JK.



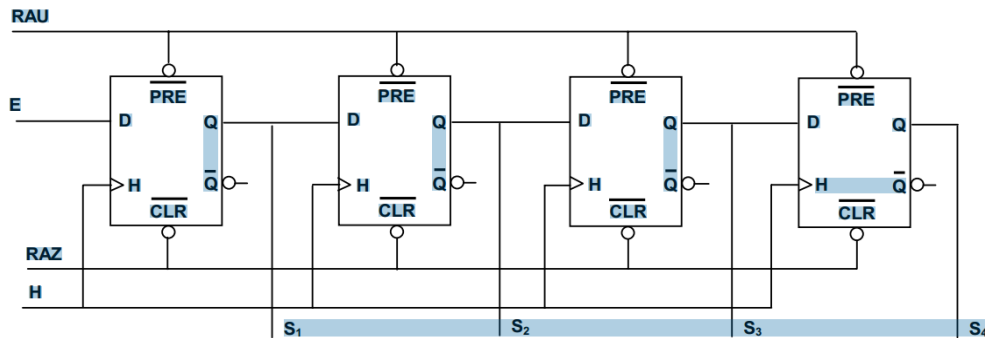
Ce type de registre est aussi appelé registre tampon. Il est souvent utilisé pour la mémorisation de données de durée brève ou pour le transfert de données.

b) Registres à entrée série, sortie série

Ce registre possède une entrée E et une sortie S. Les données binaires d'entrée sont introduites bit après bit. Elles sont également disponibles les unes après les autres au rythme de l'horloge en sortie. Ce type de registre est utilisé pour effectuer des décalages. En rebouclant la sortie de la dernière bascule sur l'entrée de la première, on obtient ce qu'on appelle un "compteur en anneau". Pour charger une donnée 4 bits initiale sur les entrées D des bascules, il faut ajouter une logique de commande composée de quelques portes supplémentaires. Cette donnée se retrouver cycliquement sur les mêmes bascules. En rebouclant la sortie complémentée Q de la dernière bascule sur l'entrée de la première, on obtient ce que l'on appelle un "compteur Johnson". Ce compteur possède un modulo égal à 2^n , où n est le nombre de bascules.

c) Registres à entrée série, sorties parallèles

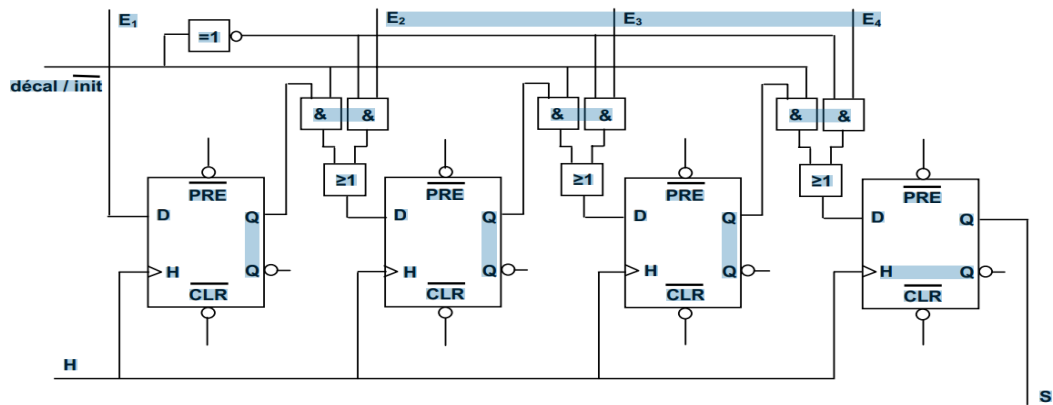
Ce registre possède une entrée E et plusieurs sorties (S1, S2, S3, S4). Les données binaires d'entrée sont introduites bit après bit. Les sorties sont toutes disponibles en même temps. Ces registres peuvent être utilisés pour faire une transformation série-parallèle des données.



La donnée est disponible après n coups d'horloge, où n est le nombre de bascules.

d) Registres à entrées parallèles, sortie série

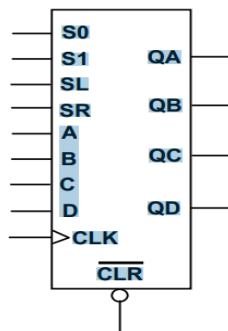
Toutes les entrées (E1, E2, E3, E4) sont introduites en même temps dans le registre. Les informations en sortie sur S sont disponibles les unes après les autres au rythme de l'horloge. Ces registres peuvent être utilisés pour faire une transformation parallèle-série des données. La sortie Q d'une bascule est reliée à l'entrée D de la bascule suivante. Les entrées parallèles ne peuvent pas être appliquées directement sur les entrées des bascules, puisqu'elles mettraient en court-circuit les sorties des bascules précédentes. Il faut utiliser une logique de commande à base de portes logiques ET et OU, ayant pour signal d'entrée une commande de chargement/décalage.



IV-2 Registres universels

Il existe des circuits intégrés regroupant les quatre types de registres présentés ci-dessus. Ils permettent les modes de fonctionnement suivants :

- Chargement et lecture parallèles.
 - Chargement série et décalages à droite ou à gauche, lecture série ou parallèle.
 - Chargement parallèle et décalages à droite ou à gauche, lecture série ou parallèle.
- Par exemple, le circuit intégré de référence 74194 possède la représentation symbolique suivante :



Les entrées A, B, C, D sont les entrées parallèles. Les entrées SL et SR sont respectivement les entrées/sorties série gauche et droite. Les entrées S0 et S1 permettent de choisir le mode de fonctionnement de ce registre (blocage, décalage à droite, décalage à gauche, chargement parallèle). L'entrée CLR (active sur niveau bas) permet une remise à zéro asynchrone des sorties. L'entrée CLK est l'entrée horloge de synchronisation. Les sorties sont QA, QB, QC, QD.

IV-3 Application des registres

Un registre permet de mémoriser de façon temporaire un mot de n bits en attendant son traitement ultérieur. Chacune de ses bascules permet de mémoriser 1 bit. Les registres sont utilisés dans les microprocesseurs pour des mémorisations temporaires des données.

Un registre de huit bits est constitué de 8 bascules synchronisées par la même horloge.

Un registre est un circuit permettant :

- De stocker une information binaire.
- De transférer une information dans certaines conditions.
- De faire des traitements simples sur les éléments binaires comme des décalages ou des rotations.

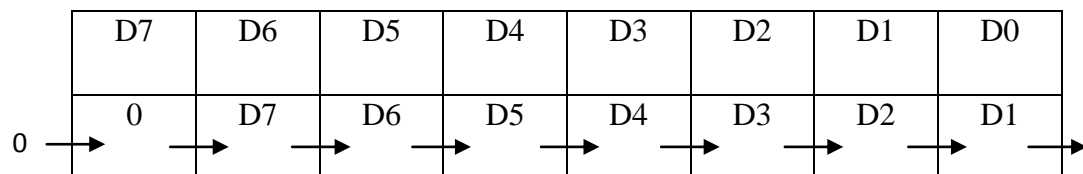
Les systèmes numériques utilisent des mots ou des nombres de n éléments binaires. On a souvent besoin d'avoir accès à un élément binaire ou un groupe d'éléments binaires. On utilise, pour cela, des fonctions de décalage des éléments binaires. Soit un mot de huit éléments binaires (constitué de huit bascules), schématisé par :

D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
----	----	----	----	----	----	----	----

On peut effectuer différents types de décalages sur ce mot.

☞ Décalage à droite

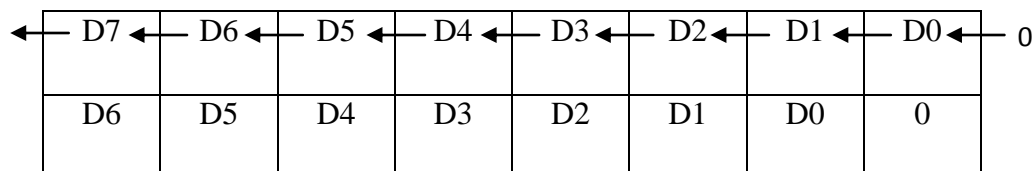
Tous les éléments binaires sont décalés d'un rang vers la droite ; il apparaît un 0 (ou un 1) sur l'élément binaire de poids fort (bit le plus à gauche). L'élément binaire de poids faible (le bit le plus à droite) est perdu.



Si la valeur 0 est entrée sur l'élément binaire de poids fort, on obtient une division par deux du nombre initial.

☞ Décalage à gauche

Tous les éléments binaires sont décalés d'un rang vers la gauche ; il apparaît un 0 (ou un 1) sur l'élément binaire de poids faible (bit le plus à droite). L'élément binaire de poids fort (le bit le plus à gauche) est perdu.



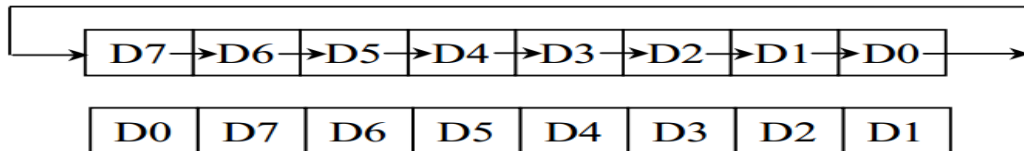
Si la valeur 0 est entrée sur l'élément binaire de poids faible, on obtient une multiplication par deux du nombre initial.

❖ Rotation

Une rotation est un décalage circulaire.

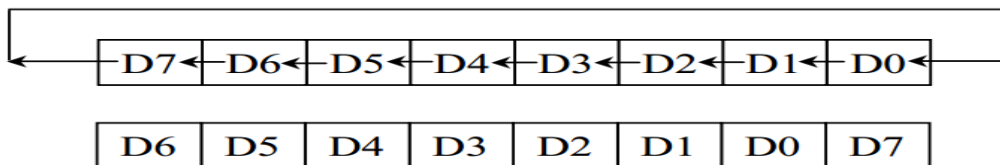
☞ Rotation à droite

Tous les éléments binaires sont décalés vers la droite et le bit de poids fort prend la valeur du bit de poids faible.



☞ Rotation à gauche

Tous les éléments binaires sont décalés vers la gauche et le bit de poids faible prend la valeur du bit de poids fort.



V- Mémoires

V-1 Définition

C'est un dispositif (électronique, magnétique) capable d'enregistrer, de conserver, et restituer des informations. Il y a écriture lorsqu'on enregistre des informations en mémoire et lecture lorsqu'on récupère des informations précédemment enregistrées.

V-2 Schéma fonctionnel d'une mémoire

