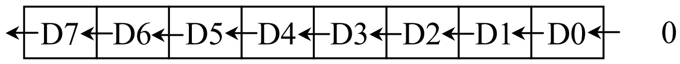
Décalage à gauche

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 droite) est perdu.



D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0	0

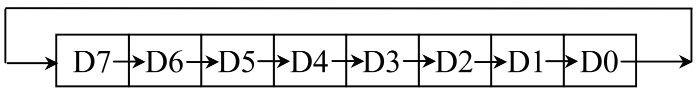
Si la valeur 0 est entré sur l'élément binaire de poids faible, on obtient une multiplication par deux du nombre initial.

b) Rotation

Une rotation est un décalage circulaire.

Rotation à droite

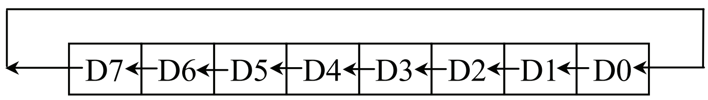
Tous les éléments binaires sont décalés vers la droite et le bit de poids fort prend la valeur du bit de poids faible.



D0	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1

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.



D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0	D7

III.3) Compteurs

Il est possible de connecter des bascules pour effectuer des opérations de comptage. Le nombre de bascules utilisées et la façon dont elle sont interconnectés déterminent le nombre d'états du compteur. L'état du compteur est défini par le nombre binaire formé par l'ensemble des sorties des bascules.

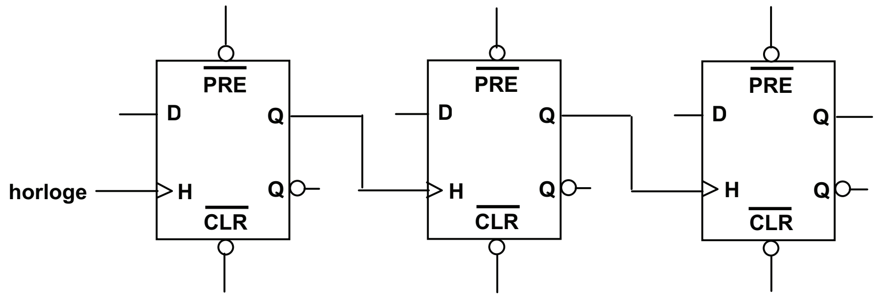
Les compteurs sont des éléments essentiels de la logique séquentielle car ils sont utilisés pour les systèmes arithmétiques, mais ils permettent aussi d'établir une relation d'ordre de succession d'événements. Ils sont utilisés notamment pour le comptage d'événements, pour diviser la fréquence, dans les automates programmables, etc.

Les compteurs sont classés en deux catégories selon leur mode de fonctionnement. On distingue les compteurs asynchrones des compteurs synchrones.

Les compteurs asynchrones ou compteurs série

La première bascule est synchronisée par une horloge externe mais le déclenchement des autres bascules est déterminé par une combinaison logique des sorties des bascules précédentes. La propagation de l'ordre de changement d'état se fait en cascade. Les sorties des bascules ne changent pas d'état exactement en même temps car elles ne sont pas reliées au même signal d'horloge.

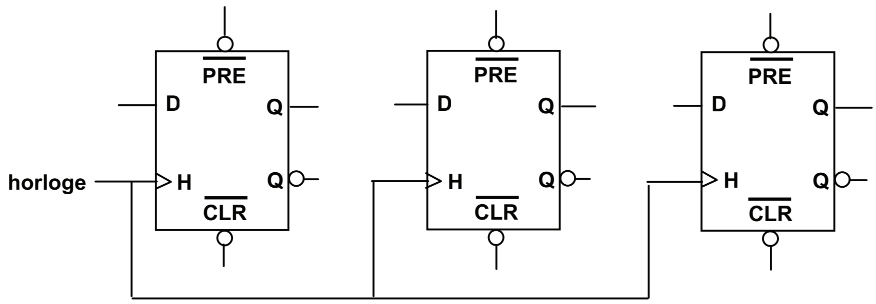
Le schéma ci-dessous est un exemple de connexion d'horloge pour obtenir un compteur asynchrone avec propagation de l'ordre de changement d'état en cascade (les entrées de donnée D étant en l'air, le schéma n'est pas complet).



Les compteurs synchrones ou parallèles

Le signal d'horloge externe est connecté à toutes les bascules et permet de les déclencher toutes simultanément.

Le schéma ci-dessous est un exemple de connexion de l'horloge pour obtenir un compteur synchrone : la synchronisation des bascules est faite par le même signal d'horloge.



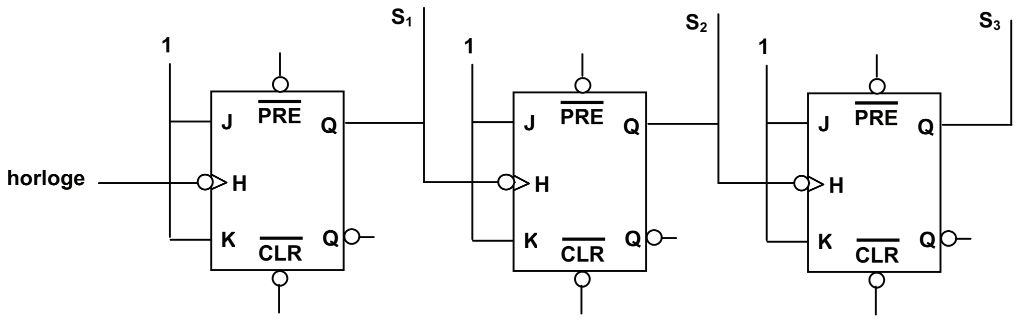
Pour chacune de ces catégories, les compteurs sont classés selon leurs séquences, le nombre d'états ou le nombre de bascules qu'ils comportent.

III.3.1) Compteurs asynchrones

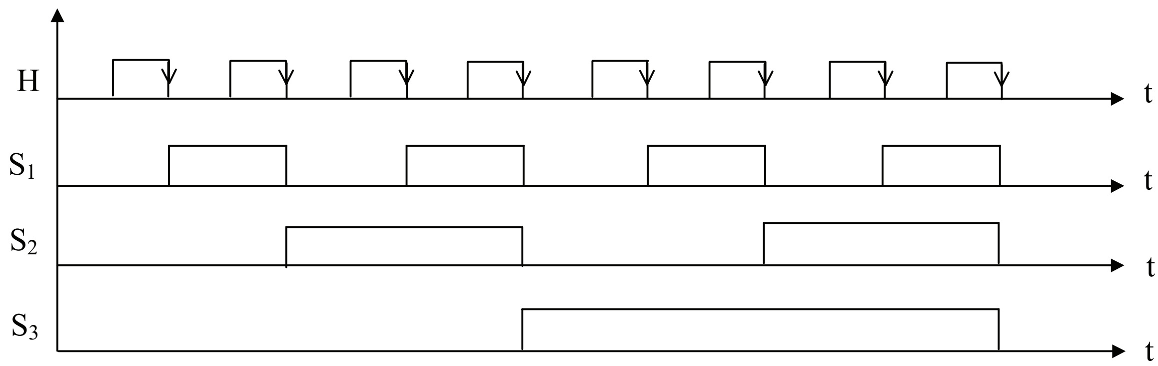
a) Compteur binaire

On a vu qu'en connectant les entrées J et K d'une bascule JK à 1, la sortie Q de cette bascule constituait la fréquence d'horloge divisée par 2.

Le schéma ci-dessous représente un exemple de compteur à 3 bascules JK.



Les entrées de pré-positionnement sont inactives car elles sont placées au niveau haut. Les entrées J et K sont à 1 donc les bascules changent d'état à chaque front actif de leur horloge (front descendant). La bascule S_1 change d'état à chaque front descendant de l'horloge externe, la bascule S_2 à chaque front descendant de S_1 et la bascule S_3 à chaque front descendant de S_1.



On affecte les poids 1, 2, 4 aux sorties S_1, S_2, S_3 des bascules. On considère qu'au départ toutes les sorties sont à zéro. On obtient le tableau suivant (il y a un changement d'état après chaque front descendant de l'horloge).

front actif de l'horloge	S_3	S_2	S_1	État
état initial	0	0	0	0
1	0	0	1	1
2	0	1	0	2
3	0	1	1	3
4	1	0	0	4
5	1	0	1	5
6	1	1	0	6
7	1	1	1	7

b) Compteur modulo N

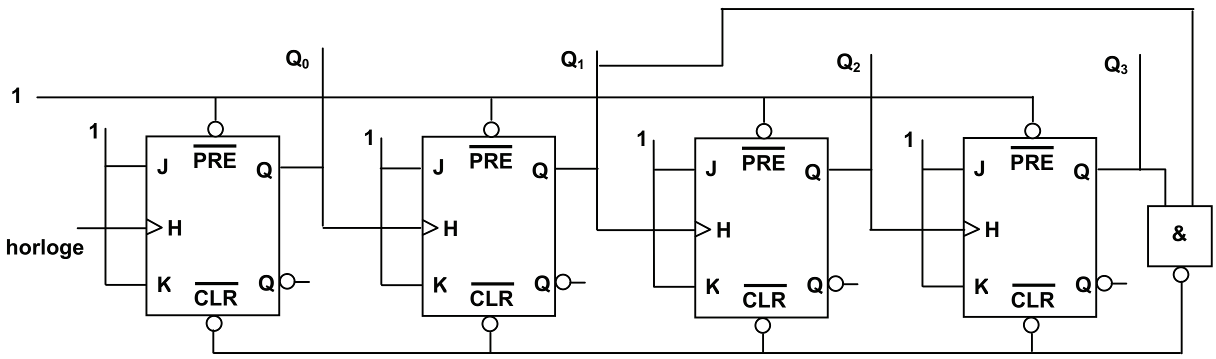
On appelle compteur modulo N, un compteur qui compte de 0 à N-1. Le compteur le plus utilisé est le compteur modulo 10 ou compteur à décade ou compteur DCB (ou BCD). Il produit une séquence de 0 à 9.

Pour réaliser un tel compteur, on va prendre un compteur binaire et tronquer sa séquence de sortie en effectuant une remise à 0 de toutes ses sortie de façon prématurée. On choisit donc la puissance de deux immédiatement supérieure à la longueur de la séquence : $16=2^4$; il faut 4 bascules pour réaliser le compteur et on va utiliser l'entrée de remise à zéro asynchrone pour tronquer la séquence à 9. Le compteur comptera donc de 0 (0000) à 9 (1001). Le principe est identique pour réaliser n'importe quel compteur modulo N.

Quand le compteur passe à l'état 1010 (10), c'est à dire quand B=D=1, on provoque une remise à zéro asynchrone du compteur par l'intermédiaire d'une porte NON-ET car l'entrée CLR est active au niveau bas.

Ce compteur reste dans l'état transitoire non souhaité 1010 (10) pendant le temps de traversé de la porte NON-ET (quelques nano-secondes), puis est ensuite remis à zéro. Pour fonctionner correctement les temps de propagation de toutes les portes doivent être identiques pour obtenir en même temps l'état 1010.

La figure ci-dessous représente un compteur décimal à base de bascule J K :



c) Inconvénients et avantages des compteurs asynchrones

Les compteurs asynchrones sont assez lents car les temps de propagation de chaque bascule s'ajoutent.

La propagation des signaux de déclenchement des bascules provoque des états transitoires qui sont indésirables quand ils sont présents durant un temps non négligeable.

Par contre, la conception de ces compteurs est très simple et les liaisons entre les bascules sont peu nombreuses.

La méthode décrite ci-dessus permet de réaliser des compteurs ou décompteurs, mais pas des séquences quelconques.

III.3.2) Compteurs synchrones

Dans les compteurs synchrones, toutes les bascules reçoivent le même signal d'horloge. Ils permettent d'éliminer les problèmes temporels dus à l'accumulation des temps de propagation des bascules.

a) Détermination directe des entrées des bascules

La conception d'un compteur consiste d'abord à établir la table de vérité recherchée.

Ensuite, il faut déterminer les combinaisons des entrées des bascules permettant d'obtenir cette table de vérité.

Prenons l'exemple d'un compteur binaire par 8, réalisé à l'aide de bascules JK. On établit d'abord sa table de vérité :

front actif de l'horloge	Q_2	Q_1	Q_0	État
état initial	0	0	0	0
1	0	0	1	1
2	0	1	0	2
3	0	1	1	3
4	1	0	0	4
5	1	0	1	5
6	1	1	0	6
7	1	1	1	7

On choisit d'utiliser des bascules avec entrée d'horloge actives sur front montant. On choisit également de relier J et K pour chacune des bascules. On sait que l'on a alors 2 cas possibles :

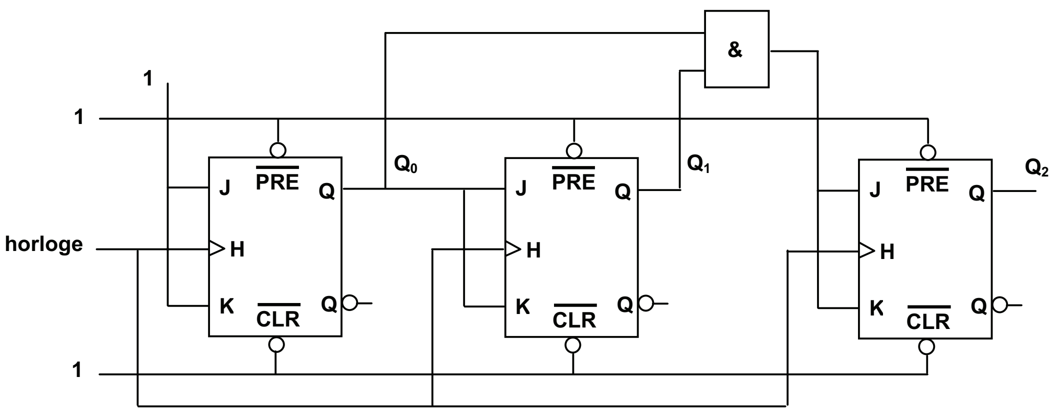
- 1er cas : J=K=0 ; au coup d'horloge, la sortie de la bascule ne change pas d'état ;
- 2e cas : J=K=1 ; au coup d'horloge, la sortie de la bascule change d'état.

On constate que la bascule Q_0 change d'état à chaque front d'horloge, on l'utilise donc comme diviseur par 2 : on a vu précédemment qu'il fallait avoir pour cela $J_0=K_0=1$.

Pour les autres bascules, on doit regarder l'état des autres sorties quand elles changent d'état. On remarque que la bascule Q_1 change d'état à chaque fois que Q_0 passe de 1 à 0, et ceci indépendamment de Q_2. Il suffit donc de relier Q_0 à J_1 et K_1. On posera donc $J_1=K_1=Q_0$.

De même, la bascule Q_2 change d'état après chaque fois que $Q_1=Q_0=1$. Il suffit d'utiliser cette condition pour avoir J_1 et K_1 à 1 au moment du coup d'horloge adéquat. On posera donc $J_1=K_1=Q_0.Q_1$.

Finalement, le schéma du circuit est le suivant :



b) Utilisation des tables de transition

Pour déterminer les combinaisons d'entrée des bascules de manière systématique, on peut utiliser la table de transition de la bascule utilisée.

Contrairement à la table de vérité qui donne les valeurs des sorties en fonction des entrées, la table de transition indique la valeur des entrées pour une transition donnée en sortie. Il y a 4 transitions possibles en sortie.

Avec des bascules JK

Pour une bascule JK, voici le rappel de sa **table de transition** :

Q_n	Q_{n+1}	J	K
0	0	0	x
0	1	1	x
1	0	x	1
1	1	x	0

On définit la **table des états futurs**, qui indique l'état futur pour tous les états possibles des sorties du compteur.

Ici il y a 3 bascules ; il y a donc 8 lignes dans cette table. On en déduit l'état des entrées J et K, à partir de la table de transition :

$Q_2(n)$	$Q_1(n)$	$Q_0(n)$	$Q_2(n+1)$	$Q_1(n+1)$	$Q_0(n+1)$	J_2	K_2	J_1	K_1	J_0	K_0
0	0	0	0	0	1	0	x	0	x	1	x
0	0	1	0	1	0	0	x	1	x	x	1
0	1	0	0	1	1	0	x	x	0	1	x
0	1	1	1	0	0	1	x	x	1	x	1
1	0	0	1	0	1	x	0	0	x	1	x
1	0	1	1	1	0	x	0	1	x	x	1
1	1	0	1	1	1	x	0	x	0	1	x
1	1	1	0	0	0	x	1	x	1	x	1

Il ne reste plus qu'à déterminer les fonctions J_i et K_i, par exemple en utilisant des tableaux de Karnaugh. Il faut un tableau pour chacune des entrées J_i et K_i, donc 6 dans notre exemple.

Les entrées de chaque tableau de Karnaugh sont les différents états de ($Q_2(n)$, $Q_1(n)$, $Q_0(n)$).

K_0 :

Q_0 \ Q_2Q_1	00	01	11	10
0	x	x	x	x
1	1	1	1	1

$K_0 = 1$

J_0 :

	00	01	11	10
0	1	1	1	1
1	x	x	x	x

$J_0 = 1$

K_1 :

$Q_0 \backslash Q_2Q_1$	00	01	11	10
0	x	0	0	x
1	x	1	1	x

$K_1 = Q_0$

J_1 :

$Q_0 \backslash Q_2Q_1$	00	01	11	10
0	0	x	x	0
1	1	x	x	1

$J_1 = Q_0$

K_2 :

$Q_0 \backslash Q_2Q_1$	00	01	11	10
0	x	x	0	0
1	x	x	1	0

$K_2 = Q_0Q_1$

J_2 :

$Q_0 \backslash Q_2Q_1$	00	01	11	10
0	0	0	x	x
1	0	1	x	x

$J_2 = Q_0Q_1$

On retrouve bien les résultats précédents.

De la même façon, on peut réaliser n'importe quel compteur ou décompteur, et plus généralement obtenir n'importe quelle séquence d'état (on obtient alors ce que l'on appelle "machine d'état").

Avec des bascules D

La table de transition de la bascule D est :

Q_n	Q_{n+1}	D
0	0	0
0	1	1
1	0	0
1	1	1

On obtient donc la table des états futurs suivante :

$Q_2(n)$	$Q_1(n)$	$Q_0(n)$	$Q_2(n+1)$	$Q_1(n+1)$	$Q_0(n+1)$	D_2	D_1	D_0
0	0	0	0	0	1	0	0	1
0	0	1	0	1	0	0	1	0
0	1	0	0	1	1	0	1	1
0	1	1	1	0	0	1	0	0
1	0	0	1	0	1	1	0	1
1	0	1	1	1	0	1	1	0
1	1	0	1	1	1	1	1	1
1	1	1	0	0	0	0	0	0

Les tableaux de Karnaugh correspondants sont :

D_0 :

Q_0 \ Q_2Q_1	00	01	11	10
0	1	1	1	1
1	0	0	0	0

D_1 :

Q_0 \ Q_2Q_1	00	01	11	10
0	0	1	1	0
1	1	0	0	1

D_2 :

Q_0 \ Q_2Q_1	00	01	11	10
0	0	0	1	1
1	0	1	0	1

D'où les équations des entrées des bascules :

$$D_0 = \overline{Q_0} \qquad D_1 = \overline{Q_0}.Q_1 + Q_0.\overline{Q_1} = Q_0 \oplus Q_1 \qquad D_2 = Q_2.\overline{Q_0} + Q_2.\overline{Q_1} + \overline{Q_2}.Q_1.Q_0$$

Le schéma se déduit alors directement de ces équations. On retrouve le schéma précédent.

c) Compteurs/décompteurs

Rappelons à nouveau la table de transition d'une bascule D :

Q_n	Q_{n+1}	J	K
0	0	0	x
0	1	1	x
1	0	x	1
1	1	x	0

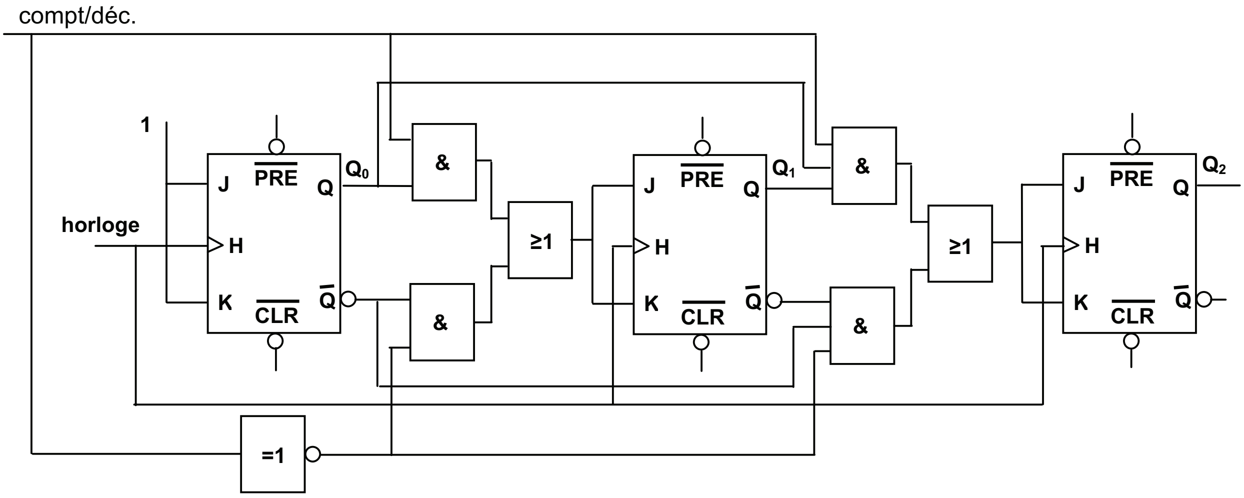
Pour obtenir un décompteur, on établit sa table des états futurs :

$Q_2(n)$	$Q_1(n)$	$Q_0(n)$	$Q_2(n+1)$	$Q_1(n+1)$	$Q_0(n+1)$	J_2	K_2	J_1	K_1	J_0	K_0
0	0	0	1	1	1	1	x	1	x	1	x
0	0	1	0	0	0	0	x	0	x	x	1
0	1	0	0	0	1	0	x	x	1	1	x
0	1	1	0	1	0	0	x	x	0	x	1
1	0	0	0	1	1	x	1	1	x	1	x
1	0	1	1	0	0	x	0	0	x	x	1
1	1	0	1	0	1	x	0	x	1	1	x
1	1	1	1	1	0	x	0	x	0	x	1

Si on la compare avec celle du compteur étudiée précédemment, on remarque que si l'on complémente toutes les valeurs des sorties $Q_i(n)$ et celles des $Q_i(n+1)$, et si l'on inverse J et K, on retrouve la table de vérité du compteur. On en déduit donc :

$$J_0 = K_0 = 1$$
$$J_1 = K_1 = \overline{Q_0}$$
$$J_2 = K_2 = \overline{Q_0}.\overline{Q_1}$$

Le schéma de ce compteur/décompteur est donc :

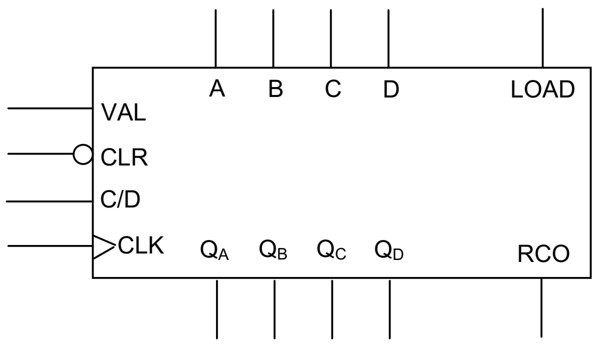


d) Compteurs intégrés

Il existe des circuits intégrés qui permettent de réaliser plusieurs types de compteurs/décompteurs avec un seul circuit.

Le circuit peut alors être vu comme une boite noire qui possède en général les fonctions suivantes :

- une entrée de remise à zéro CLR, asynchrone ou synchrone, généralement active au niveau bas ;
- une entrée de chargement LOAD, en général synchrone, d'une valeur particulière sur les entrées A, B, C, D ;
- une commande de comptage ou de décomptage C/D ;
- une sortie de détection quand toutes les sorties valent 1 pour pouvoir propager une éventuelle retenue RCO (Ripple Carry Output) ;
- une commande de validation ou d'interdiction de comptage VAL.

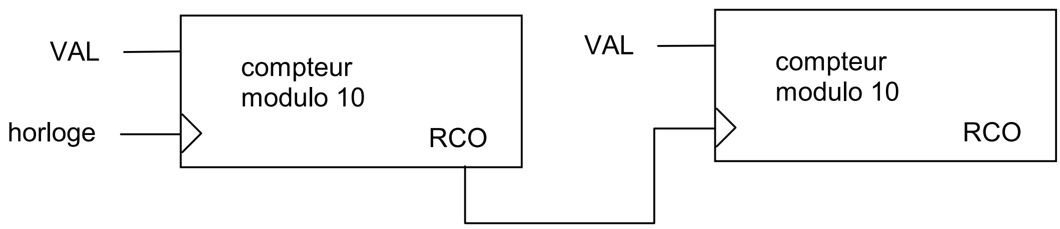


Grâce aux entrées de chargement, on peut obtenir des séquences tronquées.

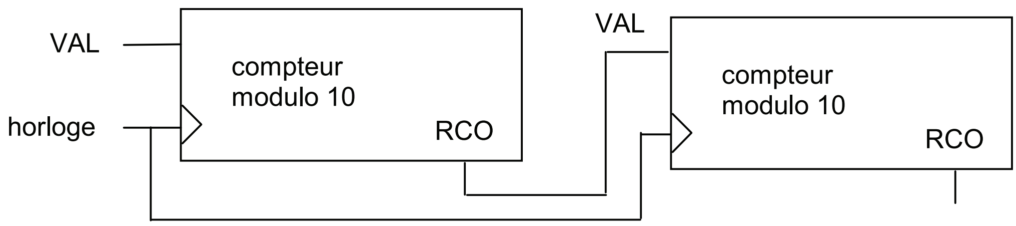
e) Mise en cascade de compteurs

On peut mettre des compteurs en cascade pour obtenir un modulo plus élevé. La sortie du dernier étage pilote une entrée du second compteur.

La mise en cascade peut être asynchrone en utilisant l'entrée horloge du second compteur :



La mise en cascade peut également être synchrone en utilisant l'entrée de validation du second compteur :



La mise en cascade de ces deux compteurs modulo 10 permet de réaliser un compteur modulo 100.

On peut par exemple réaliser un chronomètre en mettant en cascade un compteur modulo 10 et un compteur modulo 6. Le résultat sera donc un modulo 60.

III.3.3) Synchrone vs asynchrone

Les systèmes synchrones possèdent les avantages et inconvénients suivants vis-à vis des systèmes asynchrones :

- leur synthèse est plus simple (on a vu que l’on pouvait synthétiser n’importe quelle séquence, mais comment faire pareil avec un circuit asynchrone ? La réponse sort du cadre de ce cours) ;
- leur consommation est plus importante (car l’horloge fonctionne même quand le système est au repos) ;
- il sont plus lents (car il faut attendre chaque coup d’horloge pour la mise à jour des sorties et/ou états internes) ;
- un système séquentiel peut comporter des états instables, et ceux-ci peuvent durer pendant une période d’horloge (ce qui représente un inconvénient) ;
- …