

Circuits logiques combinatoires et séquentiels

Guy Bégin

16 novembre 2022

Circuits séquentiels

- Pouvoir identifier un circuit logique séquentiel
- Savoir distinguer entre les circuits séquentiels synchrones et asynchrones
- Être familier avec les principaux types de loquets, pouvoir en expliquer le fonctionnement
- Être familier avec les principaux types de bascules, pouvoir en expliquer le fonctionnement

Modèle d'un circuit séquentiel

- Les circuits logiques séquentiels sont ceux qui comportent de la mémoire.
- Le modèle général d'un circuit séquentiel est illustré sur la figure 1.

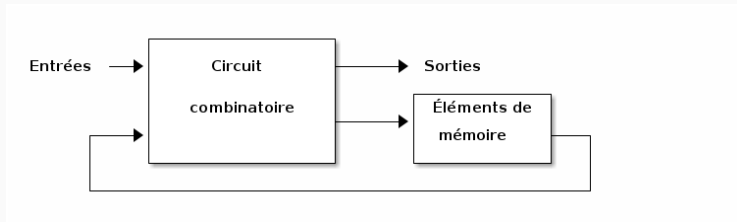


Figure 1 – Modèle de circuit séquentiel

Modèle d'un circuit séquentiel ... 2

- On y voit qu'il y a une boucle de rétroaction, qui fait que les valeurs binaires stockées dans les éléments de mémoire contribuent au calcul des sorties.
- Les sorties du circuit à un instant donné ne dépendent donc pas seulement des entrées présentes à ce moment, mais aussi de ces valeurs qui sont mémorisées dans le système.
- Pour décrire cette situation dans laquelle se trouvent les valeurs stockées en mémoire, on parle de l'état du système.
- Selon les entrées et l'état à un instant donné, le système pourra changer d'état selon les changements qui seront apportés par la portion combinatoire aux valeurs mémorisées.



Modèle d'un circuit séquentiel ... 3

- On verra donc le système évoluer au fil du temps, passant d'un état à un autre, et générant des sorties en fonction des entrées et de l'état du moment.
- Intuitivement, on peut penser que le nombre d'états distincts sera fonction du nombre de valeurs binaires qui seront mémorisées.
- Le comportement d'un système séquentiel est donc caractérisé par une séquence temporelle d'entrées, de sorties et de valeurs interne d'état.

Circuits séquentiel synchrones ou asynchrones

- On peut distinguer les circuits séquentiels selon la relation de synchronisation qui existe entre les différents signaux du système.
- Dans un circuit séquentiel **synchrone**, le comportement du système peut se définir en fonction des valeurs de ses signaux à des instants discrets prédéterminés.
- Le comportement d'un circuit séquentiel **asynchrone** dépend à tout moment des signaux d'entrée et de l'ordre dans lequel ces signaux changent.

Circuits séquentiel synchrones

- Un circuit séquentiel synchrone fait appel à un signal spécial appelé **horloge** qui rythme les changement d'état et de sorties afin qu'il se produisent à des instants discrets.
- Les éléments de mémoire qui stockent les valeurs binaires sont appelés **bascules** (*flip-flops* en anglais).
- Il existe différents types de bascules.
- Nous les étudierons en détail, car elles sont à la base des circuits séquentiels les plus utilisés.

Modèle de circuit séquentiel synchrone

- La figure suivante présente le modèle général d'un circuit séquentiel synchrone.

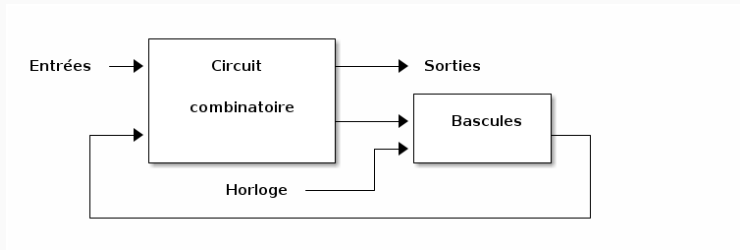


Figure 2 – Modèle de circuit séquentiel synchrone

- Le signal d'horloge est typiquement une onde carrée, telle qu'illustré sur la figure suivante.

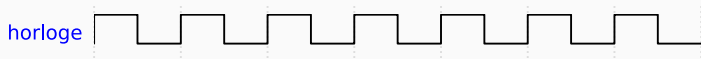


Figure 3 – Signal d'horloge

- Un élément de mémoire peut maintenir son état binaire indéfiniment (à condition, évidemment, qu'il soit alimenté).
- Son état est observable par l'intermédiaire de ses sorties.
- On doit agir via la ou les entrées de l'élément pour le faire changer d'état.
- Les différents types d'éléments de mémoire sont caractérisés par le nombre et le type d'entrées.

Éléments de mémoire . . . 2

- Les éléments de mémoire qui sont contrôlés par les niveaux de leurs entrées sont appelés des **loquets** (*latches* en anglais).
- Les éléments contrôlés par des changements ou **transitions** de niveaux sont appelés des bascules.
- Les transitions sont appliquées à une entrée spéciale d'horloge qui sert à déclencher les changements d'état à des instants précis.
- Les loquets sont des ingrédients de base dans la conception des bascules.
- Nous les étudierons en premier.

- Le loquet SR est formé de deux portes NOR interconnectées et comporte deux entrées : S pour Set, qui permet de mémoriser une valeur 1, et R pour Reset, qui permet de mémoriser une valeur 0.
- Le schéma classique du loquet SR montré sur la figure 4 ne fait pas ressortir la boucle de rétroaction, mais si on déplace un peu les éléments sans changer les connexions, on voit mieux le lien de retour caractéristique de la boucle.
- Sur la figure 5, la porte reliée à S a été placée devant, mais nous aurions pu tout aussi bien mettre l'autre porte en avant.
- Aucune des deux n'est vraiment devant l'autre, puisqu'il s'agit d'une boucle n'ayant ni début ni fin.

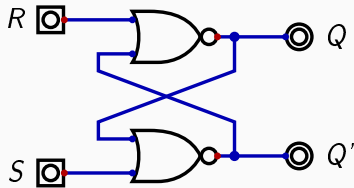


Figure 4 – Schéma du loquet SR avec portes NOR

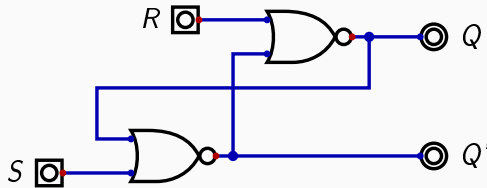


Figure 5 – Schéma du loquet SR NOR mettant la boucle en évidence

- Quand les sorties sont $Q = 1, Q' = 0$, on dit que le loquet est dans l'état activé (set).
- Lorsque $Q = 0, Q' = 1$, le loquet est désactivé (reset).
- Les sorties Q et Q' sont normalement complémentaires.
- Si on active la condition d'entrée $S = 1, R = 1$, les deux sorties seront à 0, mais lorsqu'on relâchera les entrées, le loquet passera à un état imprévisible, voire instable.

- Dans une application normale, on voudra éviter la cas d'entrée $S = 1, R = 1$.
- En fonctionnement normal, à moins de vouloir changer l'état, on garde les deux entrées à $S = 0, R = 0$ et l'état du loquet se maintient.
- En appliquant le niveau 1 pendant un certain temps à S seulement, le loquet s'active, peu importe l'état dans lequel il se trouvait auparavant.

- On doit s'assurer de ramener l'entrée S à 0 avant d'effectuer d'autres changements aux entrées, pour éviter le cas interdit $S = 1, R = 1$.
- De même, en appliquant le niveau 1 pendant un certain temps à R seulement, le loquet se désactive, peu importe l'état dans lequel il se trouvait auparavant.

Table 1 – Loquet SR NOR : tableau de fonctionnement

S	R	Q	Q'	
1	0	1	0	
0	0	1	0	après $s = 1, R = 0$
0	1	0	1	
0	0	0	1	après $s = 0, R = 1$
1	1	0	0	interdit

Loquet SR avec portes NAND

- On peut aussi concevoir un loquet avec des portes NAND, comme sur la figure 6.

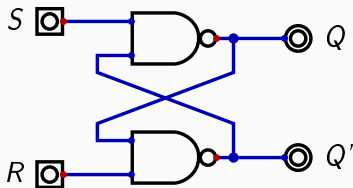


Figure 6 – Loquet SR en portes NAND

- Le fonctionnement est sensiblement le même, si ce n'est que les niveaux sont inversés par rapport au loquet NOR comme on peut le voir sur le tableau de fonctionnement (tableau 2).
- Par exemple, on garde les deux entrées à $S = 1, R = 1$ pour maintenir l'état du loquet.

Table 2 – Loquet SR NAND : tableau de fonctionnement

S	R	Q	Q'	
1	0	0	1	
1	1	0	1	après $s = 1, R = 0$
0	1	1	0	
1	1	1	0	après $s = 0, R = 1$
0	0	1	1	interdit

Loquet avec signal de contrôle

- On peut ajouter un signal de contrôle d'entrée E (*enable*) pour contrôler **quand** le loquet pourra être affecté par les signaux d'entrée.
- Le circuit est représenté à la figure 7.

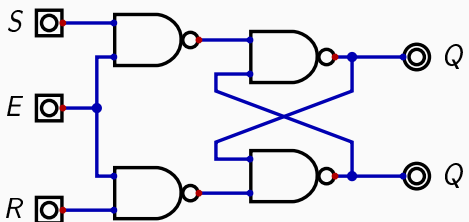


Figure 7 – Loquet SR NAND avec signal de contrôle

Table 3 – Loquet SR avec signal de contrôle : tableau de fonctionnement

E	S	R	prochain Q
0	X	X	inchangé
1	0	0	inchangé
1	0	1	$Q = 0$
1	1	0	$Q = 1$
1	1	1	indéterminé

Loquet avec signal de contrôle ... 2

- Comme on peut voir dans le tableau 3, les sorties des portes NAND d'entrée demeurent à 1 tant que $E = 0$, et le loquet ne peut pas être affecté par les entrées S et R .
- Quand on active $E = 1$, le circuit peut être actionné par les entrées S et R .
- La condition pour activer est $S = 1, R = 0$; pour désactiver, c'est $S = 0, R = 1$.
- Lorsque $E = 1$, on ne doit pas faire $S = 1, R = 1$, car on mettrait le loquet dans un état indéterminé.
- Le loquet SR avec contrôle est surtout important comme ingrédient de base pour la conception de bascules.

- Une option pour éliminer la condition qui fait apparaître un état indéterminé est de s'assurer de toujours commander S et R avec des signaux complémentaires.
- C'est ainsi qu'on arrive au loquet D, illustré sur la figure 8, qui ne comporte qu'une entrée de données D et une entrée de contrôle E .
- La valeur de D est reflétée à Q lorsque $E = 1$ et se maintient après que E passe à 0 (tableau 4).

Loquet D : schéma

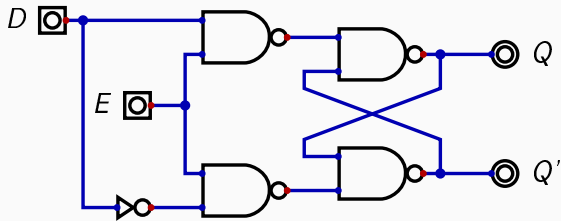


Figure 8 – Schéma du loquet D

Table 4 – Loquet D : tableau de fonctionnement

E	D	prochain Q
0	X	inchangé
1	0	$Q = 0$
1	1	$Q = 1$

- Le symbole graphique d'un loquet D est illustré à la figure suivante.



Figure 9 – Symbole du loquet D

Application : rebonds d'interrupteurs

- Lorsqu'on utilise un interrupteur pour commuter un signal entre les niveaux qui correspondent aux valeurs logiques 0 et 1, le contact ne se fait pas de façon franche sans hésitations, et le signal observé rebondit plusieurs fois avant de se stabiliser à sa valeur, comme on peut le voir sur la partie de gauche de la figure 10.
- Ces rapides aller-retours entre les niveaux peuvent bien souvent déclencher un circuit logique et le mettre dans un état imprévisible.

Contacts et rebonds

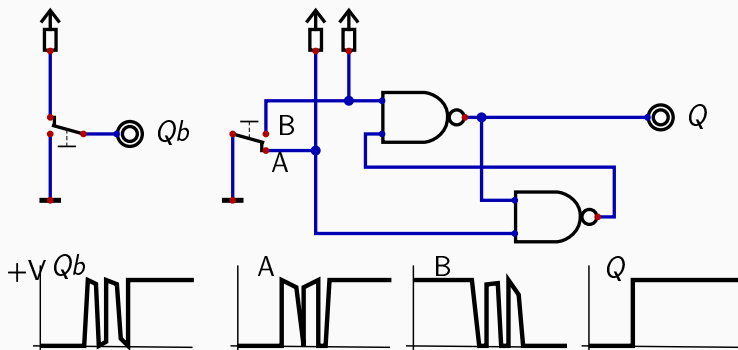


Figure 10 – Contacts et rebonds

Application : loquet contre rebonds d'interrupteurs

- Pour éviter ce problème, on peut faire appel à un loquet selon la configuration de la partie droite de la figure.
- Le loquet réagit dès que l'entrée B passe à 0.
- Même si cette entrée remonte à 1, la valeur Q est maintenue.
- On obtient donc une transition franche sur Q .

Bascules (Flip Flops)

- Les loquets peuvent remplir le rôle de mémoriser des valeurs binaires, mais le fait que les changements d'état soient activés par un **niveau** pose des difficultés.
- En effet, si les valeurs à l'entrée changent pendant que le signal de contrôle est actif, la valeur qui sera mémorisée par la rétroaction sera la dernière qui aura eu le temps de s'y établir, qui ne sera pas nécessairement la valeur que le concepteur voulait.
- Si la sortie du loquet est acheminée, directement ou à travers un circuit combinatoire, vers ses entrées ou les entrées d'autres loquets (activés par le même signal de contrôle) dans une boucle du circuit séquentiel, il se peut que les délais de propagation et de prise en compte des entrées fassent que la sortie globale du circuit séquentiel soit imprévisible.



Bascules (Flip Flops) ... 2

- La conception des bascules vise à corriger ce problème, en établissant un instant précis et prévisible de déclenchement où les valeurs d'entrée seront prises en compte systématiquement.
- Le concept essentiel est que l'état d'une bascule est modifié uniquement au moment où il y a un changement dans son signal de contrôle.
- Ce changement momentané est appelé **transition** et on dit que c'est la transition qui provoque le changement d'état qui **déclenche** la bascule.

Bascules et déclenchement

- On parlera de déclenchement sur le **front montant** lorsque la transition qui provoque le déclenchement passe d'un niveau bas vers un niveau élevé, et de déclenchement sur le **front descendant** dans le cas d'une transition du haut vers le bas.
- On illustre parfois le front de déclenchement au moyen d'une flèche, comme on peut le voir sur la figure 11.

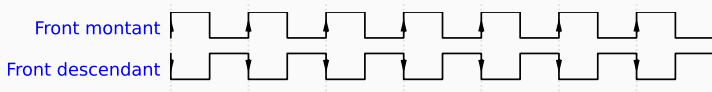


Figure 11 – Signaux d'horloge avec fronts de déclenchement

Le secret pour isoler la valeur mémorisée par l'élément de mémoire des changements qui pourraient survenir sur les entrées consiste à utiliser un mécanisme semblable à celui d'un sas.

Selon Larousse, la définition d'un sas est

Enceinte ou passage clos, muni de deux portes ou systèmes de fermeture dont on ne peut ouvrir l'un que si l'autre est fermé et qui permet de passer ou de faire passer d'un milieu à un autre en maintenant ceux-ci isolés l'un de l'autre.

- Dans notre contexte, nous utiliserons deux loquets en série, avec la sortie du premier, appelé **maître** reliée à l'entrée du deuxième, appelé **esclave**.
- Le loquet maître sera activé par le signal d'horloge alors que le loquet esclave sera activé par le complément du signal d'horloge.
- De cette façon, un seul des loquets sera actif à la fois, comme dans un sas.
- La figure 12 illustre la configuration pour réaliser une bascule D maître-esclave.

Bascule D maître-esclave

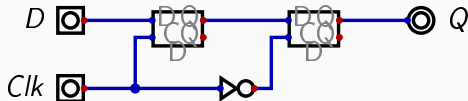


Figure 12 – Bascule D maître-esclave

Bascule D maître-esclave : fonctionnement

- Lorsque le signal d'horloge est au niveau haut, seul le loquet maître pourra réagir au signal d'entrée.
- Puis, lorsque le signal d'horloge sera au niveau bas, ce premier loquet sera désactivé, sa sortie sera maintenue, et le deuxième loquet sera activé.
- Comme l'entrée du loquet esclave est alimentée par le loquet maître dont la sortie est maintenue, c'est la valeur mémorisée par le maître qui sera mémorisée dans l'esclave, et qui apparaîtra donc en sortie de l'ensemble.

- La valeur qui sera ultimement mémorisée est celle qui se trouvait tout juste avant la transition de l'horloge passant du niveau haut vers le niveau bas.
- Nous avons donc créé une bascule sensible au **front descendant**.

En résumé :

1. La sortie Q ne changera qu'une seule fois par cycle d'horloge.
2. Un changement de valeur sera causé par la valeur d'entrée présente juste avant le front descendant de l'horloge.
3. La valeur de sortie changera effectivement (s'il y a lieu) pendant la demi-période basse de l'horloge.

- D'autres configurations permettent de réaliser ce comportement de sas.
- Par exemple, le circuit de la figure 13 utilise trois éléments en loquet SR NAND : les deux premiers sont activés par le signal de donnée D et l'horloge, et le dernier mémorise et fournit le signal de sortie Q .
- Cette configuration réalise une bascule D à déclenchement sur front montant.

Bascule D à déclenchement sur front montant

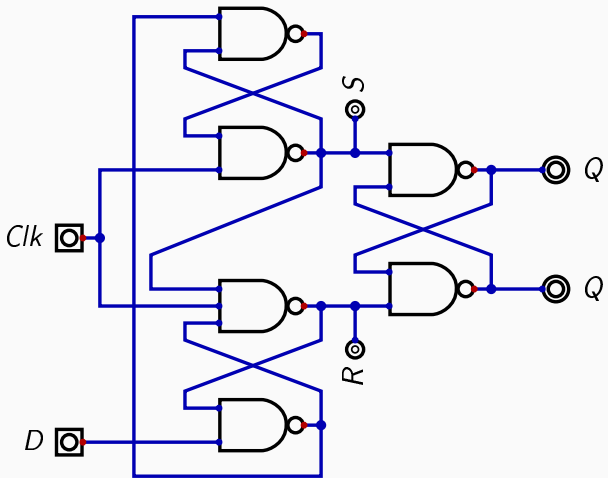


Figure 13 – Bascule D à déclenchement sur front montant

Bascule D à déclenchement sur front montant ... 2

- Pour bien comprendre son comportement, la série de figures suivantes permet d'en suivre le fonctionnement.
- Sur les figures, les valeurs binaires sont indiqués par des couleurs : un signal en vert sombre dénote la valeur 0 et un signal en vert clair représente la valeur 1.
- Comme on peut voir sur la figure 14, lorsque $clk = 0$, les entrées intermédiaires S et R sont maintenues au niveau 1, quelle que soit la valeur de l'entrée D , ce qui assure de maintenir la valeur de sortie en Q .

Bascule au repos

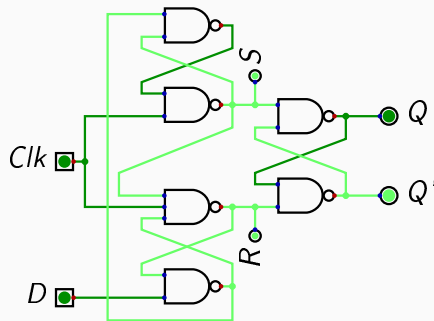


Figure 14 – Bascule au repos $clk = 0, D = 0$

Bascule en maintien

Même lorsque l'entrée de donnée D change, la valeur de sortie est maintenue, comme on voit sur la figure 15.

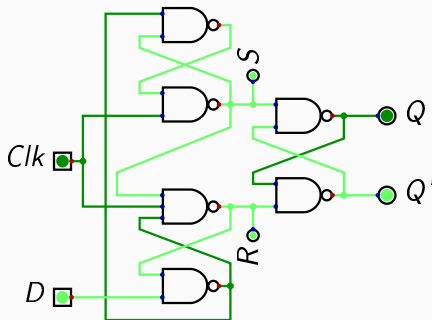


Figure 15 – Bascule au repos $clk = 0$, $D \rightarrow 1$

Bascule : opération reset

Si l'entrée de donnée $D = 0$ lorsque clk passe à 1, R devient 0, ce qui met Q à 0 (opération *reset*) (figure 16).

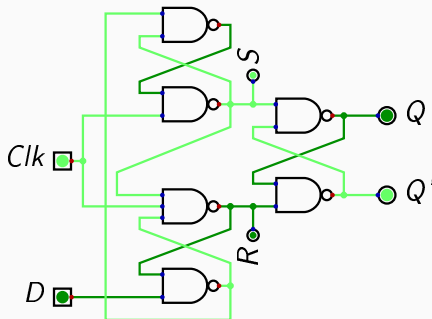


Figure 16 – Bascule *reset* $clk \rightarrow 1, D = 0$

Bascule : entrée de donnée qui change

Si l'entrée de donnée D change pendant que $clk = 1$, comme sur la figure 17, R reste à 0, parce que la porte NAND à trois entrées a ses trois entrées à 1 : par le signal $clk = 1$, par la rétroaction du signal S et par le signal de sortie de la porte NAND du bas.

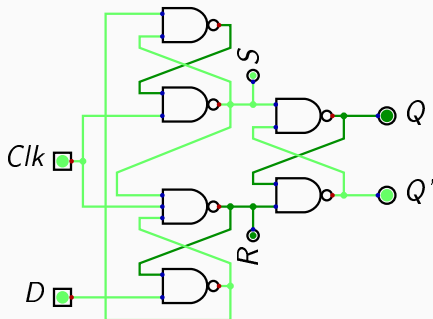


Figure 17 – Bascule $clk = 1, D \rightarrow 1$

Quand clk revient à 0, on a $S = 1, R = 1$ et la sortie Q ne peut plus changer.

Bascule avant changement de clk

La figure 18 présente la bascule dans l'état $Q = 0$ avec l'entrée de donnée $D = 1$, juste avant que clk passe à 1. On voit que les deux portes NAND du haut sont prêtes à provoquer un changement d'état de S lorsque l'horloge passera à 1.

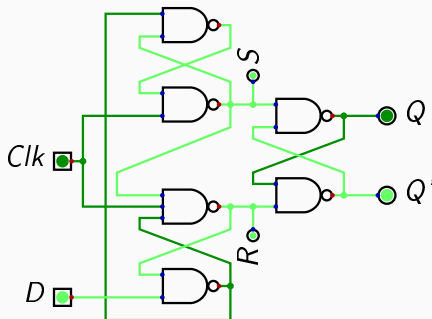


Figure 18 – Bascule $clk = 0, D = 1$

Bascule opération set

Si l'entrée de donnée $D = 1$ lorsque clk passe à 1, on voit que S est devenu 1, ce qui a amené Q à 1 (opération set) (figure 19).

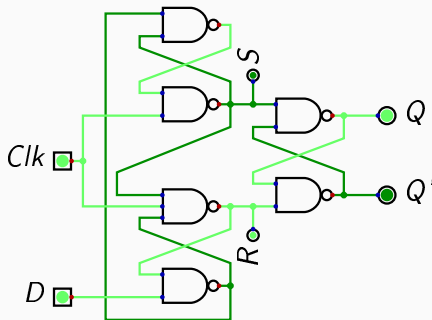


Figure 19 – Bascule set $clk \rightarrow 1, D = 1$

Chronogramme

La figure 20 présente un chronogramme qui montre la bascule qui passe de l'état 0 à l'état 1 et retourne, au cycle suivant, à l'état 0.

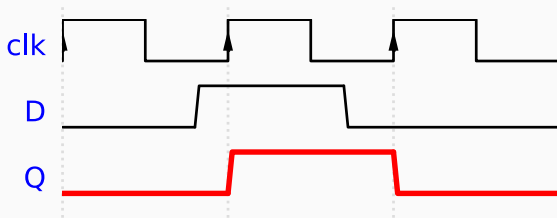


Figure 20 – Chronogramme pour une bascule D

- Comme dans tout circuit logique, les changements de valeurs logiques dans les différentes portes qui constituent une bascule ne sont pas instantanés.
- Il faut donc laisser le temps nécessaire pour que les changements puissent se propager, être pris en compte et se stabiliser.
- Sur la figure 21, on indique le délai t_{setup} entre le moment où la valeur à l'entrée de donnée D est modifiée et la prochaine transition de déclenchement de l'horloge.

Chronogramme avec temps et délais

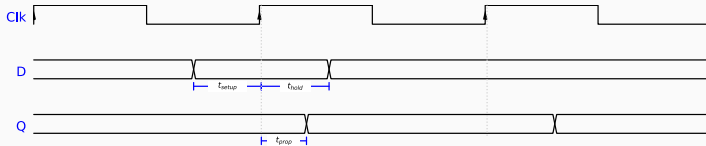


Figure 21 – Chronogramme avec temps et délais

Délais et réponse temporelle . . . 2

- Pour assurer un fonctionnement adéquat de la bascule, on doit respecter un temps de **mise en place** (*setup*) minimum pendant lequel la valeur à l'entrée de donnée D doit être maintenue **avant** la transition de déclenchement.
- On montre aussi sur la figure le délai t_{hold} entre le moment de déclenchement, et un prochain changement de valeur à l'entrée de donnée D.
- Pour un fonctionnement adéquat, on doit également respecter un temps de **maintien** (*hold*) minimum pendant lequel la valeur à l'entrée de donnée D doit être maintenue **après** la transition de déclenchement de l'horloge.
- Enfin, la figure montre le délai de propagation à la sortie de la bascule t_{prop} , qui se mesure entre le moment du déclenchement et le moment où la sortie se stabilise à sa nouvelle valeur.



Symbole de la bascule D

- Le symbole graphique d'une bascule D comporte un petit triangle à l'entrée d'horloge pour indiquer que le déclenchement se fait sur une transition.
- Un déclenchement sur front descendant est indiqué par un petit cercle d'inversion à l'entry d'horloge.



Figure 22 – Symboles de bascules

Il y a essentiellement trois opérations possibles pour une bascule :
mettre sa sortie à 1 (*set*), mettre sa sortie à 0 (*reset*) ou faire
basculer son état de sortie (*toggle*).

Bascule JK

- Une bascule JK comporte deux entrées, ce qui permet de lui faire exécuter les trois opérations. Activer seulement l'entrée *J* fait un *set*, activer seulement l'entrée *K* fait un *reset* et activer les deux entrées fait un *toggle*.
- On peut réaliser une bascule JK comme sur la figure 23.

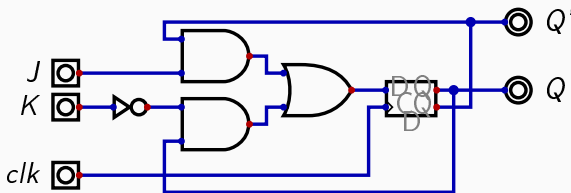


Figure 23 – Bascule JK

Bascule JK : Chronogramme

La figure 24 montre le chronogramme de fonctionnement d'une bascule JK. La bascule fait d'abord un *set*, puis un *reset* et enfin trois *toggles* de suite.

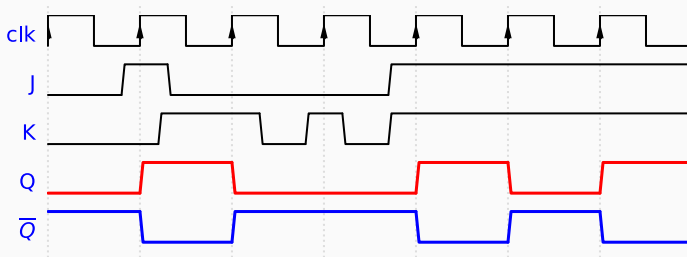


Figure 24 – Chronogramme de la bascule JK

Bascule T

La bascule T (T pour *toggle*) change d'état à chaque déclenchement lorsque l'entrée T est activée. On peut la réaliser à partir d'une bascule D ou d'une bascule JK (figure 25).

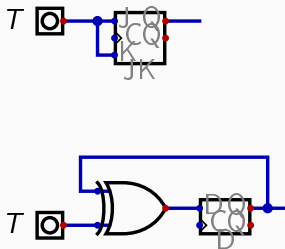


Figure 25 – Bascule T

- On résume le fonctionnement des différentes bascules au moyen de tableaux qui décrivent, selon les conditions d'entrée et l'état présent, quel sera le prochain état après le déclenchement.
- $Q(t)$ représente l'état présent et $Q(t + 1)$ l'état suivant.

Table 5 – Bascule D

D	$Q(t + 1)$	
0	0	<i>reset</i>
1	1	<i>set</i>

Tableau caractéristique : bascule JK

Table 6 – Bascule JK

J	K	$Q(t + 1)$	
0	0	$Q(t)$	pas de changement
0	1	0	<i>reset</i>
1	0	1	<i>set</i>
1	1	$Q'(t)$	basculement

Table 7 – Bascule T

T	$Q(t + 1)$	
0	$Q(t)$	pas de changement
1	$Q'(t)$	basculement

Équations caractéristiques

- On peut de même formuler des équations qui décrivent le comportement des bascules. Pour une bascule D, on a

$$Q(t+1) = D$$

- Pour une bascule JK, on a

$$Q(t+1) = JQ' + K'Q$$

- Pour une bascule T, on a

$$Q(t+1) = T \text{ Xor } Q = TQ' + T'Q$$



Entrées asynchrones

- Certaines bascules sont aussi munies d'entrées asynchrones, dont l'effet n'est pas soumis à l'horloge.
- Ces entrées sont typiquement utilisées pour faire un *reset* ou un *set* de la bascule, par exemple pour une remise à zéro initiale d'un circuit séquentiel.
- Une configuration typique est illustrée par la bascule de la figure 26 qui comporte une entrée *Reset* qui permet de forcer l'état en agissant sur une porte NAND de chacune des paires de portes.
- Cette entrée est active au niveau bas, c'est pourquoi il y a une indication de complément dans son symbole.

Bascule D avec reset asynchrone

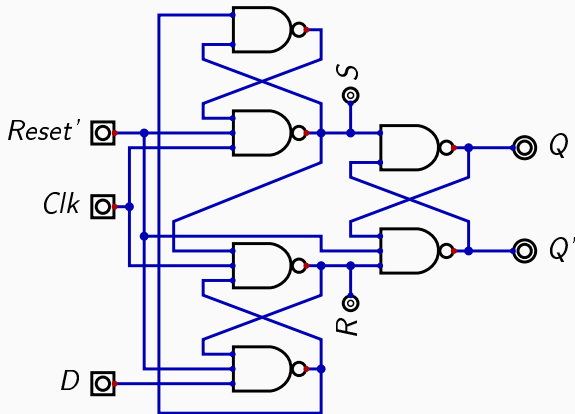


Figure 26 – Bascule D avec reset asynchrone