Les circuits multistables

Moyennant l'adjonction de quelques circuits annexes, la simple bascule RS devient un élément bistable extrèmement puissant pour le concepteur : elle atteint toute sa fonctionnalité sous le nom de bascule JK.

Interdisons la manœuvre interdite

Il semblerait intéressant de faire en sorte que la « manœuvre interdite » devienne impossible. Les portes logiques sont là pour nous permettre d'y arriver. La figure 11 indique une solution possible. Les portes NAND 1 et 2 sont montées comme sur la figure 5, mais, pour les commander, on passe par deux autres portes NAND, 3 et 4. On utilise, en plus, un inverseur logique I.

Quand la commande E est au niveau bas, les points (M) et (N) sont automatiquement au niveau haut (une seule entrée au niveau bas dans une porte NAND porte sa sortie au niveau haut), quel que soit l'état de l'entrée A. Alors, 1 et 2 jouent leur rôle de bistable normal, et tout se passe comme si l'entrée (A) avait été débranchée du circuit.

Si la commande E est au niveau haut, la commande (A) se retrouve inversée en (P). On trouve donc, en (N), le même niveau logique qu'en (A) (le « contraire du contraire », c'est la même chose) et, en (M), un niveau opposé. Une seule des commandes du bistable (M) ou (N), est alors portée à un niveau bas, provoquant la commande du bistable, sans aucune ambiguïté.

Donc, quand E est au niveau haut, le niveau de logique de A est transmis en Q. Quand E passe au niveau bas, la sortie Q garde l'état qu'elle avait au moment où E est passé au niveau bas et n'est plus influencée par la valeur de (A).

Le circuit que nous venons de réaliser est très utilisé. On le nomme un « verrou » (ou « latch » en anglais). Il sert très souvent d'intermédiaire entre les sorties d'un compteur et les entrées des décodeurs commandant les affichages.

Ainsi, quand les entrées E de ces circuits sont hautes, les circuits sont « transparents », transmettant les sorties du compteur aux décodeurs, donc aux afficheurs. Dès que l'on porte les entrées E au niveau bas, on « gèle » les affichages. C'est ce qui correspond à la commande « lap » de ces chronomètres électroniques bien classiques, que l'on commence à trouver pour des prix négligeables un peu partout.

Signalons que, dans le montage de la figure 11, il aurait été possible de supprimer l'inverseur I et d'avoir deux entrées, une en (A), l'autre en (P). A condition d'appliquer sur ces deux entrées des niveaux opposés, on dispose alors d'un ensemble qui peut :

— retransmettre le niveau de (A) en Q et le niveau (opposé) de (P) en Q': si (E) est haut ;

— garder en mémoire le dernier état de Q et Q' quand (E) est bas.

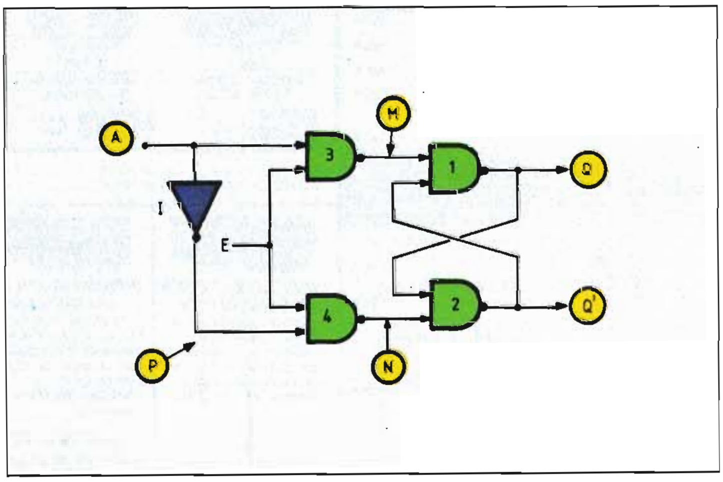

Fig. 11. — L'entrée E, quand elle est au niveau bas, permet au bistable constitué par les portes 1 et 2 de garder la mémoire du dernier état (il est alors « déconnecté » des entrées). Si E est au niveau haut, le niveau de A est transféré en Q : le montage est « transparent ».

Un maître et un esclave... fort démocratiques

Le dernier circuit que nous venons de décrire (celui de la figure 11, sans inverseur, avec deux entrées) peut constituer la moitié d'un montage fort intéressant. Tout le monde le connaît ou, plus exactement, le connaît... « de l'extérieur », sans savoir comment cela fonctionne « dans la boîte ». Or, il est très important de savoir comment les choses se passent dans ladite boîte, car cela permet de mieux comprendre et de réaliser d'autres circuits qui en dérivent si besoin est.

La figure 12 indique le mode de connexion des circuits. On y voit, répété deux fois, le circuit réalisé à partir de celui de la figure 11. Le premier, celui de gauche, réalisé avec les portes 5, 6, 7 et 8, se nomme « le maître ». Celui de gauche, utilisant les portes 1, 2, 3 et 4, est l'« esclave ».

« Horrible — diront certains : des esclaves au XX^e^ siècle ! » Rassurez-vous : nous allons voir que, régulièrement, il y a inversion des rôles, et que si, pendant la moitié du temps, le maître commande l'esclave, pendant l'autre moitié, c'est l'es-

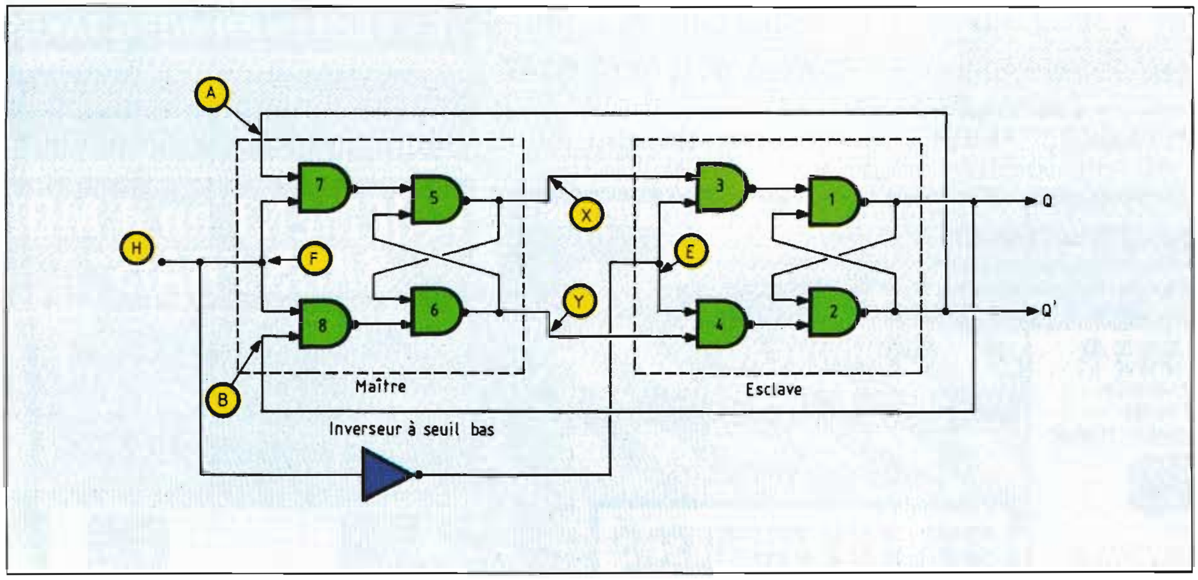

Fig. 12. — Avec deux montages du type de la figure 11 et un inverseur à seuil bas, on réalise le basculeur « maître-esclave ».

clave qui commande le maître. Donc, inutile d'aller alerter la LDCI (Ligue des Droits des Circuits Intégrés).

Les sorties du « maître », soit (X) et (Y), commandent directement les entrées de « l'esclave ». Mais, si l'on a bien réalisé une sorte de « serpent qui se mord la queue » en reliant les sorties Q et Q' de l'esclave aux entrées (B) et (A) du maître, on l'a fait en « croisant » ces connexions. Cette structure fait penser à la fameuse « bande de Moebius » (vous connaissez sûrement : la bande de papier, ayant une longueur supérieure à dix fois sa largeur, que l'on referme sur elle-même pour réaliser un anneau, mais en imprimant à la bande une torsion). Cette étrange surface n'a qu'un seul côté, car, en suivant sa surface d'un doigt, on passe une fois « en dessus » et une fois « en dessous » du papier. Mieux encore, coupez-la avec des ciseaux en deux bandes de demi-largeur, la coupure se refermant sur elle-même, et vous n'aurez pas deux anneaux, mais un seul.

Ne lâchez pas tout !

Etant donné le curieux type de couplage des deux groupes de circuits, il y a une manœuvre à ne pas faire : porter les deux commandes (E) et (F) au niveau haut en même temps.

En effet, si l'on avait cette mauvaise idée, le maître et l'esclave seraient tous deux « transparents », transmettant chacun sur ses sorties les niveaux (opposés) qui sont sur leurs entrées. Donc, le niveau de (A) passe en (X), puis en (Q), mais il arrive donc en (B), donc en (Y), donc en (Q')... situation insoluble, les sorties Q et Q' ne pouvant être que le contraire de ce qu'elles sont (les lecteurs sont invités à méditer sur le sens philosophique profond de cette dernière assertion).

Donc, pour ne pas pousser notre réalisation au désespoir (au suicide ?), nous allons faire en sorte que (F) et (E) ne soient **jamais** au niveau haut en même temps. Pour l'exécution de cette consigne de sécurité, nous nous en remettrons au circuit I, désigné d'une façon un peu mystérieuse sous le nom d'« inverseur à seuil bas ».

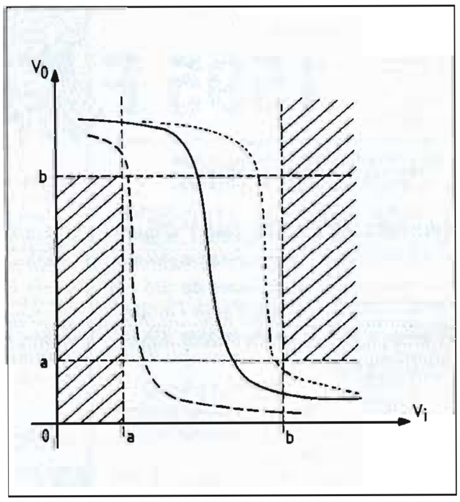

Fig. 13. — Un inverseur logique est caractérisé par une courbe de réponse, qui doit contourner certaines zones, constituant un « gabarit », le niveau a étant celui du « zéro logique » et b celui du « un logique ». Il peut être à seuil moyen (courbe en trait plein), à seuil bas (courbe en tirets) ou à seuil haut (courbe en pointillé).

Revenons un peu là-dessus. Un inverseur logique est un circuit qui donne, à sa sortie, un niveau opposé à celui que l'on applique sur son entrée. La figure 13 montre comment varie le niveau de sa sortie Vo en fonction de son entrée Vi.

Tout ce que l'on demande à cette courbe est de passer dans les « bonnes » zones du tracé. En effet, nous considérons comme niveau zéro toute tension inférieure à un seuil défini, a. Sera considéré comme « un » tout niveau correspondant à une tension supérieure à un autre seuil défini, b (classiquement, dans les circuits CMOS, on considère que a est le tiers de la tension d'alimentation, b valant les deux tiers de cette tension).

La courbe de réponse du circuit doit donc être toute entière hors des zones hachurées, qui constituent pour elle un « gabarit ». La courbe tracée en trait plein répond à ce critère. Mais la courbe en tirets y répond aussi, de même que la courbe en pointillés.

La courbe en tirets correspond à un inverseur « à seuil bas », celle en pointillé à un inverseur « à seuil haut ».

Nous allons choisir, pour le circuit I, un inverseur à seuil particulièrement bas, alors que les circuits 3, 4, 7 et 8 seront « à seuil haut ».

page pub retirée

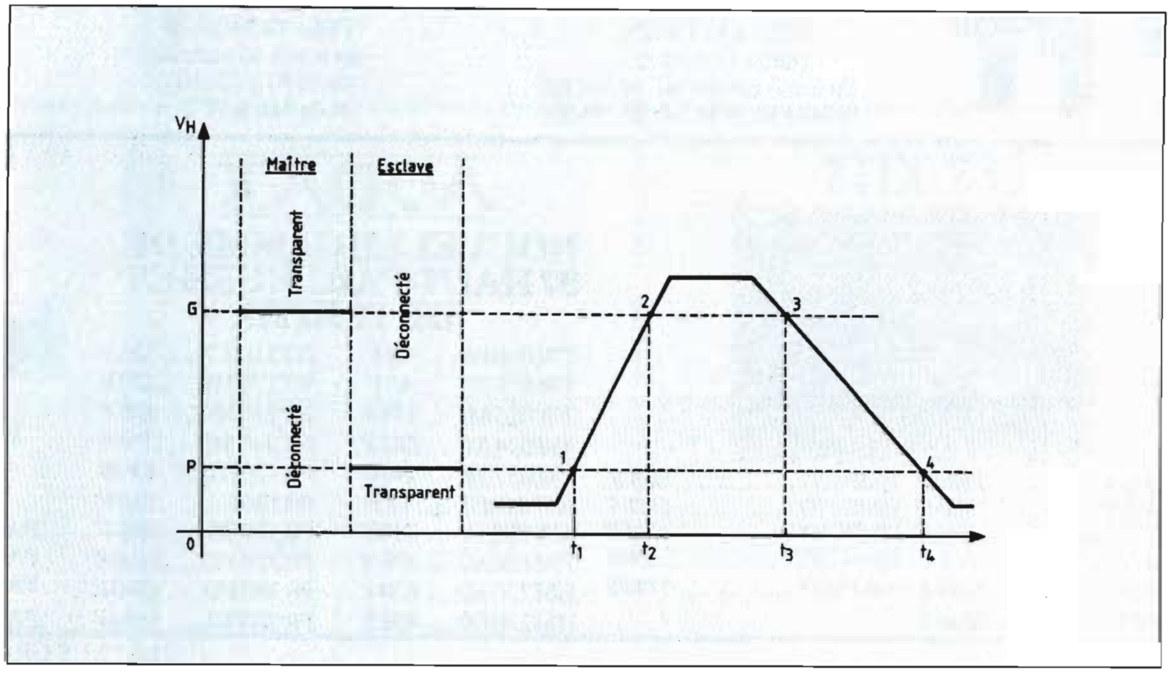

Fig. 14. — On voit à gauche ce qui se passe dans le « maître » et dans l'« esclave » selon la valeur de la tension en H. Sur la courbe, on trouve les quatre points correspondant aux quatre phases du cycle de basculement complet du bistable maître-esclave.

Ainsi, nous pouvons être sûrs que jamais (F) et (E) ne seront hauts en même temps. Dès que la tension en (H) commence à monter, bien avant qu'elle ne soit « considérée » par les circuits 7 et 8 (qui sont à seuils hauts) comme « haute », elle provoque le passage au niveau bas de la sortie de l'inverseur, autrement dit de l'entrée (E). Le maître et l'esclave, ayant sur leurs entrées E et F des niveaux que l'on doit considérer comme « bas », sont alors tous les deux « figés », dans le mode où tout se passe comme s'ils étaient déconnectés de leurs entrées.

Faisons monter la tension en H

Supposons que nous appliquions, maintenant, à l'entrée H du montage de la figure 12 un signal qui varie dans le temps comme l'indique la figure 14. Sur cette figure, nous avons tracé deux horizontales d'ordonnées respectives P et G, qui correspondent aux seuils de l'inverseur pour P, des circuits 3, 4, 7 et 8 pour G.

Sur la gauche de la figure, nous avons indiqué, dans deux bandes verticales, le comportement du maître et de l'esclave en fonction de la tension appliquée en H. On voit que le maître (à gauche) est « transparent » (ses entrées sont transférées à ses sorties) si la tension en H est supérieure à G et « déconnecté » (insensible à ses entrées) quand cette tension est inférieure à G.

En ce qui concerne le circuit esclave, il n'est transparent que si la tension en H est inférieure à P. Dès que cette tension est supérieure à P, l'esclave est en mode « déconnecté ».

Nous supposerons que, au départ, dans notre montage, la sortie Q est au niveau bas, donc Q' au niveau haut. Au départ, H est au niveau bas, donc la sortie de l'inverseur à seuil bas est haute, le circuit esclave est « passant ». Comme nous avons supposé que Q est bas et Q' haut, cela implique que X soit bas et Y haut. Etant donné que Q est relié à B et Q' à A, le circuit maître a donc ses sorties opposées à ses entrées. C'est parfaitement possible puisque sa commande F est à niveau bas.

Faisons monter lentement le signal en H. Au temps t_1, nous franchissons le seuil de l'inverseur (point 1), ce qui amène au niveau bas la commande E. L'esclave est donc alors, comme l'était déjà le maître, déconnecté de ses entrées. Cependant, à part le niveau en E, rien ne se modifie dans le montage : l'esclave et le maître, tous deux « déconnectés », sont en mode « mémoire », ils gardent sur leurs sorties les valeurs qui y étaient.

Continuons à faire croître la tension en H. Au temps t_2, nous arrivons au point 2, qui correspond au seuil G, celui des circuits 7 et 8 entre autres. Le maître reçoit donc, sur son entrée F, un niveau considéré comme haut. Il passe alors en mode « transparent ».

Comme, dès le départ, il avait ses sorties X et Y opposées à ses entrées A et B, il y aura changement des niveaux de A et de B : Y passe au niveau bas et X passe au niveau haut.

Il est à remarquer que, alors, l'esclave a des entrées opposées à ses sorties : X est haut alors que Q est bas, Y est bas alors que Q' est haut. Mais il n'y a rien d'impossible à cela, puisque ce circuit est dans son état « déconnecté ».

Maintenant, on redescend

Nous allons maintenant, après avoir maintenu la tension en H à une valeur constante et haute (supérieure à G), la faire redescendre. Au temps t_3, nous arriverons au point 3 de la figure 14. Le niveau en F ne sera plus considéré comme haut par le circuit maître, qui passe en mode déconnecté (mais rien ne change dans ses sorties, qui gardent la mémoire de l'état qu'elles avaient avant cette déconnexion).

Continuons à faire descendre la tension en H. Nous allons arriver, au temps t_4, au

point 4 de la figure 14. Là, l'inverseur répond, faisant passer au niveau haut sa sortie, amenant donc l'esclave en mode transparent. Comme son entrée X est haute et son entrée Y basse, l'esclave va immédiatement reporter ces valeurs sur ses sorties, Q deviendra haut et Q' passera au niveau bas.
Cela va provoquer l'apparition d'un niveau haut sur B et d'un niveau bas sur l'entrée A. Le maître a donc, comme au départ, ses entrées opposées à ses sorties. Mais, comme il est en mode « déconnecté », cela n'entraîne rien.
On voit donc que, au cours de ce signal montant puis descendant, nous avons eu :
— au point 1, déconnexion de l'esclave ;
— au point 2, le maître devient transparent, il recopie ses entrées A et B sur ses sorties qui, par conséquent, s'inversent ;
— au point 3, le maître est de nouveau déconnecté ;
— au point 4, l'esclave redevient transparent, il recopie ses entrées X et Y sur ses sorties Q et Q', qui, par conséquent, s'inversent.
On voit donc que, pour une montée et une descente du signal en H, l'ensemble a changé d'état.
Ce bistable « maître-esclave » est un circuit fondamental, dont la mise en service (il y a déjà plus de vingt-cinq ans de cela) marque un changement total dans la technique des bistables dits « T' ».

T comme transition

D'où vient ce nom ? Nous avons déjà vu les bistables du type « R-S » (Reset-Set) à deux entrées. Un bistable de type T n'a qu'une seule entrée et l'application d'un signal complet sur cette entrée le fait changer d'état, quel qu'ait été son état précédent.
Il y a donc commande systématique par l'entrée en question, on dit que le bistable à commande unique est du type T, le T évoquant la « transition » d'un état à l'autre sous l'effet du signal de commande. Le fameux « Eccles-Jordan » que nous avons évoqué était un exemple de bistable de type T. Mais... qu'il avait mauvais caractère : il fallait, pour le déclencher, une impulsion bien calibrée, de front bien défini, de largeur comprise entre deux limites proches, d'amplitude calibrée, sinon, il se fâchait.
L'apparition du master-slave (nom anglais du « maître-esclave ») a proprement révolutionné la technique des bistables de type T, donc du comptage binaire. Il ne demande pas d'impulsion de commande calibrée, pas de durée précise, pas de flanc avant à vitesse de montée précise. Le signal en H doit seulement partir d'une valeur inférieure à P, monter au-delà de G et redescendre en dessous de P.

Deux entrées de plus

Le basculeur maître-esclave de la figure 12 est très employé, mais on trouve surtout une version encore plus évoluée de cet ensemble, que l'on nomme le « basculeur J-K ».
N'allez pas croire qu'il soit beaucoup plus compliqué dans sa structure. Il suffit de remplacer les portes NAND à deux entrées 7 et 8 de la figure 12 par des portes NAND à trois entrées. Nous n'avons pas redessiné le circuit, il suffit de s'imaginer les entrées en question ajoutées sur le schéma de la figure 12. L'entrée supplémentaire de la porte 7 se nomme « J », celle de la porte 8 se nomme « K ».
Qu'avons-nous gagné à augmenter ainsi la complexité du circuit ? Beaucoup de choses. Mais commençons par montrer que notre nouveau montage peut « se ramener au cas précédent », comme aiment à le faire les mathématiciens.
En effet, si ces entrées J et K sont constamment portées au niveau haut, tout se passe comme si elles n'existaient plus. Une porte NAND à trois entrées, dont une des entrées est au niveau haut, se comporte, par rapport à ses deux autres entrées, comme une porte NAND à deux entrées.
« Remarquable ! vont objecter quelques lecteurs : on a mis une troisième entrée dans deux portes et elle ne sert à rien ! Autrement dit, c'est la méthode Shadock : pourquoi faire simple quand on peut faire compliqué ? »
Si nous avons envisagé ce cas des entrées J et K « inutiles », c'est pour faire comprendre comment le montage fonctionne dans un cas bien précis, celui où l'on a J = 1 et K = 1. Mais ces entrées vont cesser d'être sans effet si l'une ou l'autre est à zéro (ou si elles y sont toutes les deux).

On bloque tout !

Supposons d'abord que J et K sont nulles toutes les deux. Les portes 7 et 8 ont donc toutes les deux une sortie haute, quel que soit le niveau de l'entrée H. Le montage est donc « figé » dans son état actuel, les signaux en H ne font plus rien. L'auteur s'attend à des commentaires désabusés, du genre : « Ces entrées supplémentaires peuvent donc faire comme si elles n'existaient pas ou empêcher tout fonctionnement : beau perfectionnement ! »
On peut déjà répondre à l'objection qu'il peut être utile d'avoir, dans un basculeur, une commande qui le rend sensible ou insensible à l'action de l'entrée H. Mais nous allons voir que l'on peut aller plus loin.
Supposons que Q soit à zéro et Q' à 1. Portons l'entrée J à 1 et l'entrée K à 0. Dans la porte 7, l'entrée A est haute, l'entrée J aussi, donc, quand H va monter, la sortie de cette porte passera au niveau bas. En ce qui concerne la porte 8, l'entrée K à 0 n'agit pas, puisqu'il y a déjà l'entrée B qui est à 0. Cette porte maintient donc sa sortie constamment haute, quel que soit le niveau de H.
Donc, une impulsion montante puis descendante sur H fera basculer le bistable : Q passera au niveau haut, Q' au niveau haut.
Seulement, maintenant, une nouvelle impulsion en H n'agira plus. En effet, Q' étant bas, l'entrée A est basse, donc la porte 7 a sa sortie haute, quel que soit le niveau de H. Et, pour la porte 8, c'est maintenant qu'intervient l'entrée K au niveau zéro : cette porte va, elle aussi, garder une sortie au niveau haut, quel que soit le niveau de H.
Donc, si nous avons J = 1 et K = 0, le basculeur peut basculer s'il part de l'état où Q = 0, mais il ne bascule pas s'il part de l'état où Q = 1.
Par symétrie (ou par paresse de répéter le raisonnement), nous pouvons étendre l'étude du circuit au cas où J = 0 et K = 1. On trouverait facilement que, alors, un signal montant et descendant en H :
— n'agit pas sur le basculeur si l'on part de l'état où Q = 0 ;

— fait basculer le montage si l'on part de l'état où Q = 1.

Résumons les choses

Notre circuit peut donc, suivant les niveaux appliqués aux entrées J et K :
— être toujours sensible au signal en H (si J = 1 et K = 1) : quel que soit l'état initial du basculeur, il change d'état sous l'effet du signal en H ;
— n'être jamais sensible au signal en H (si J = 0 et K = 0) : le signal en H le laisse dans l'état où il était, quel qu'il soit ;
— être sensible au signal en H uniquement pour passer de l'état Q = 0 à l'état Q = 1 (si J = 1 et K = 0) et pas pour le passage inverse ;
— être sensible au signal en H uniquement pour passer de l'état Q = 1 à l'état Q = 0 (si J = 0 et K = 1) et pas pour le passage inverse.
Nous voyons donc que, en désignant l'état où Q = 0 sous le nom d'état « repos » et celui où Q = 1 comme état « travail », les quatre possibilités offertes suivant les niveaux de J et K font que le basculeur répond au signal en K :
— toujours (si J = 1 et K = 1) ;
— jamais (si J = 0 et K = 0) ;
— uniquement du repos au travail (si J = 1 et K = 0) ;
— uniquement du travail au repos (si J = 0 et K = 1).
C'est cette grande souplesse d'utilisation qui fait du basculeur JK « l'arme lourde » des concepteurs de circuits basculeurs complexes.

Deux « tables de vérité »

On rend compte habituellement du comportement du JK par une « table de vérité » telle que la reproduit la figure 15, qui nécessite des explications.
Dans les colonnes de gauche, on a mis les valeurs logiques des entrées J et K, telles qu'elles étaient après la nième impulsion d'horloge (en H). Dans la colonne de droite, sous le nom Q_{n+1}, se trouve l'état de la sortie Q après l'impulsion d'horloge numéro n + 1.
La première ligne indique que, pour J = 0 et K = 0, la sortie Q_{n+1} a gardé la valeur qu'elle avait avant l'impulsion, autrement dit qu'elle est égale à Q_n.
La deuxième ligne nous montre que, pour J = 1 et K = 0, après une impulsion d'horloge, la sortie Q est à 1 (elle y était peut-être avant, elle y est certainement après).
La troisième ligne indique que, pour K = 1 et J = 0, la sortie au temps n+1 est zéro (si elle n'y était pas avant, elle a changé ; si elle y était, elle est restée sans changement).
Enfin, la quatrième ligne indique que, avec J = 1 et K = 1, la sortie Q au temps n+1 est le contraire de ce qu'elle était au temps n, ce qui se note en écrivant la valeur Q_n avec un trait au-dessus.
L'auteur avoue qu'il n'aime guère la table de vérité « traditionnelle » de la figure 15, qui est plutôt faite pour vérifier qu'un JK se comporte bien comme on l'avait prédit. Quand on utilise un JK, c'est pour le faire basculer suivant un programme

J	K	Q_{n+1}
0	0	Q_n
1	0	1
0	1	0
1	1	$\overline{Q_n}$

Fig. 15. — Le basculeur « JK » répond différemment à l'action de l'impulsion n° n+1 selon les valeurs des entrées J et K, suivant la « table de vérité » qui résume et explique son fonctionnement.

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

Fig. 16. — Autre table de vérité du JK, plus commode pour l'utilisateur.

qu'on lui impose. Plutôt que de savoir comment il réagit aux valeurs de J et K, il est bien plus intéressant de savoir ce que l'on doit appliquer à J et K pour obtenir un résultat donné.
On arrive alors à la table de vérité de la figure 16. Dans les deux colonnes de gauche, Q_n et Q_{n+1}, on met la valeur de Q après l'impulsion d'horloge n° n (soit Q_n) et celle que nous désirons obtenir après l'impulsion n° n+1, soit Q_{n+1}.
Dans les deux colonnes de droite, on met les valeurs à donner à J et K juste avant l'impulsion n° n+1 pour obtenir le résultat cherché. Dans ces colonnes, le signe x indique que le niveau peut être indifféremment 0 ou 1.
Cela demande un peu d'explications. Pour la première ligne, si l'on part de $Q_n = 0$ et que l'on veuille arriver à $Q_{n+1} = 0$, la solution qui vient à l'esprit est celle de la première ligne de la table de la figure 15 : J = 0 et K = 0, ainsi le basculeur ne change pas d'état.
Mais il ne faut pas oublier qu'on obtiendrait aussi le résultat cherché par J = 0 et K = 1, car (deuxième ligne de la table de la figure 15) cette configuration amène Q à 0 s'il n'y était pas et l'y maintient s'il y était. Elle constitue une autre solution possible de notre problème. Donc, il faut bien que J soit au zéro, mais K peut être indifféremment au zéro ou au 1, ce que l'on indique en mettant un x.
Le raisonnement est analogue pour la ligne 2. On souhaite que Q, initialement au zéro, passe au 1. Une solution évidente est de prendre J = 1 et K = 1 (changement d'état systématique). Mais, comme le montre la troisième ligne de la table de la figure 15, avec J = 1 et K = 0, le passage de Q de 0 à 1 aura lieu. Donc, J doit être 1, K est indifférent.
Pour la troisième ligne, on veut partir de Q à 1 et arriver à Q = 0. On pourrait utiliser J = 1 et K = 1 (changement d'état pour chaque impulsion), mais aussi K = 1 et J = 0, ainsi que le montre la troisième ligne de la table de la figure 15. Donc, K doit être à 1, mais J est indifférent.
En raisonnant de même, on voit que, si l'on part de Q = 1 et que l'on veut y rester, l'essentiel est que K soit nul, J étant indifférent.

(à suivre)

J.P. Œhmichen