

INITIATION À LA PRATIQUE DE L'ÉLECTRONIQUE

Circuits multistables

(Suite voir N° 1818)

La grande souplesse d'utilisation de la bascule JK permet de l'engager, avec d'autres identiques, dans des circuits de logique séquentielle assez complexes. Ainsi sont conçus les compteurs binaires ou, surtout, décimaux.

Des J-K en cascade

Si nous envisageons de réaliser le compteur binaire le plus simple qui soit, il suffit de monter des basculeurs J-K en cascade comme l'indique la figure 17. Les trois basculeurs (on pourrait en mettre plus) ont tous leurs entrées J et K au + (donc au niveau haut).

Le signal d'entrée, E, est appliqué à l'entrée horloge (généralement désignée par CK, d'après le nom anglais *clock* de l'horloge) du basculeur B₁. Ce dernier changera d'état quand l'entrée F, après être montée, redescendra.

Nous supposons que, initialement, tous les basculeurs ont été remis au zéro. Les basculeurs J-K ont tous, indépendamment de leurs entrées CK, J et K, deux entrées supplémentaires, une de « mise au zéro »

(appelée 0, ou Clr, du nom anglais *clear* de l'effacement) et une autre de « mise au 1 » (appelée 1, ou Pr, de « *preset* », ou mise en position).

Donc, au premier signal « complet » (une montée puis une descente) en E, B₁ basculera, sa sortie Q passant au niveau haut. Cela ne suffit pas pour commander B₂, mais, quand une deuxième impulsion arrivera en E, B₁ rebasculera, sa sortie Q₁ repassera au niveau bas et B₂ aura alors son signal de commande « complet », ce qui le fera basculer.

On voit donc que tout basculeur dont la sortie repasse au niveau bas après être passée auparavant au niveau haut commandera le changement d'état du basculeur qui le suit. Faites le compte : nous avons bien réalisé un bon compteur binaire. Tout cela est bien connu.

Des retards échelonnés

Mais notre compteur, s'il a le mérite d'être simple, présente un défaut : il n'est pas, comme on dit, « synchrone ». Autrement dit, quand plusieurs de ses basculeurs doivent changer d'état **en même temps**, il y aura, en fait, un petit retard pour certains d'entre eux par rapport à d'autres.

On le voit bien en supposant un compteur à cinq basculeurs, qui est arrivé dans

un état tel que les quatre premiers ont leurs sorties au niveau haut, le dernier ayant la sienne au niveau bas.

Théoriquement, une impulsion à l'entrée devrait faire en même temps passer les quatre premiers basculeurs au niveau bas et le cinquième au niveau haut.

Mais, quand un basculeur reçoit une impulsion de commande, il ne réagit pas instantanément : entre le flanc descendant de l'impulsion d'horloge et le changement de niveau de la sortie Q, il y a un petit « temps de propagation ». Par exemple, dans le HEF 4027 alimenté sous 12 V, ce temps est de l'ordre de 40 ns.

En représentant l'état du compteur par des nombres binaires, les unités à droite, les « deuxaines » à gauche des unités, les « quatraines » à gauche des deuxaines... nous dirons que le compteur doit passer de :

0 1 1 1 1 à 1 0 0 0 0

Or, on conçoit bien que le basculeur des unités, directement attaqué, va passer le premier à zéro. Il commandera le second, mais ce dernier, pour commander le troisième, le fera avec son retard propre par rapport au retour du premier au niveau bas. Le troisième passera à zéro avec un retard à peu près double par rapport au premier... et ainsi de suite.

Autrement dit, on ne passe pas d'un seul coup de l'affichage 01111 à l'affichage 10000. On aura, comme états **transitoires**, les affichages *01110*, *01100*, *01000*, *00000* et enfin 10000, les états indiqués en italiques étant chacun présent pendant un temps très court.

Est-ce grave ? Si l'on désire seulement compter, puis, une fois le comptage fini, lire le résultat, ces retards n'ont aucune importance : les retards, même cumulés, sont rigoureusement négligeables par rapport au temps que l'on met pour lire le résultat du comptage.

Mais si l'on désire comparer l'état des sorties du compteur, pour savoir, par des circuits à coïncidence, le moment où ces sor-

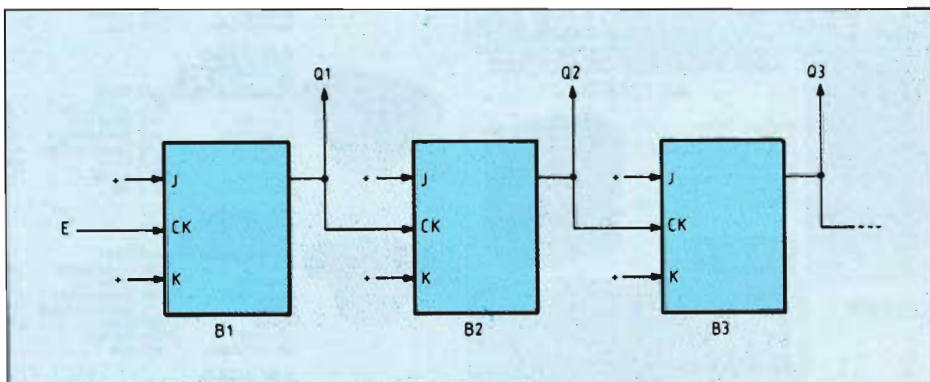


Fig. 17. — Les basculeurs J-K, ayant tous leurs J et leur K au niveau haut, basculent à chaque impulsion complète d'horloge (montée puis descente). Ainsi connectés, ils forment un compteur binaire.

ties passeront par un état donné, l'accumulation des retards entraîne des effets catastrophiques.

En effet, comme on l'a vu, entre l'état (stable) 01111 (qui correspond en binaire au nombre quinze) et l'état également stable 10000 (soit, en binaire, seize), on a vu que l'on aura, pendant un temps très court, un état transitoire, par exemple le 01100 (soit, en binaire, douze). Donc, nous aurons des « fausses coïncidences ». Peut-on éliminer ces retards parasites ? Oui, et le compteur est alors dit « synchrone », car tous les basculeurs qui doivent changer d'état en même temps le font effectivement.

Un compteur binaire synchrone à deux étages

Pour réaliser un compteur binaire synchrone bien modeste (deux étages seulement), on peut le faire comme l'indique la figure 18. On voit que le même signal d'horloge attaque les deux basculeurs (ce qui sera le cas pour tous les compteurs synchrones). Mais, comme le second ne doit réagir à cette impulsion que si le premier a sa sortie Q_1 au niveau haut, on a utilisé cette sortie Q_1 pour commander les J et K du second basculeur.

Donc, quand les deux basculeurs sont au zéro, la première impulsion d'horloge n'agit que sur B_1 , puisque B_2 , ayant ses J et K au niveau bas, est insensible à l'horloge. Tout change pour la deuxième impulsion. Quand elle arrive, les J et K de B_2 sont hauts, donc B_2 est sensible à cette impulsion, et il va basculer, Q_2 passant de 0 à 1 en **même temps** que Q_1 passe de 1 à 0.

Nous avons donc bien réalisé un compteur synchrone. Mais les choses vont se compliquer un peu quand nous voudrions passer à trois étages, ou plus.

En effet, dans un compteur à trois étages, le basculeur B_3 devra être sensible aux impulsions d'horloge seulement quand les sorties Q_1 et Q_2 seront hautes toutes les deux avant l'arrivée de l'impulsion. Il faudra donc commander les J et K du troisième basculeur par la sortie d'une porte ET, dont les deux entrées sont commandées respectivement par Q_1 et Q_2 .

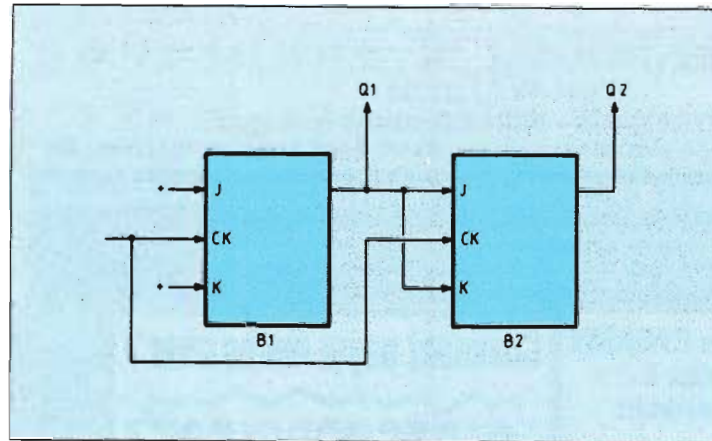


Fig. 18. — En commandant les J et K du second basculeur par la sortie Q_1 du premier, on peut alors attaquer les entrées d'horloge par le même signal. Le compteur est du type « synchrone ».

Ce n'est pas encore bien grave, une porte ET (que l'on peut d'ailleurs remplacer par un circuit à deux diodes, comme nous le verrons plus loin) n'est pas grand-chose. Seulement, si nous augmentons le nombre de basculeurs, les choses se compliquent. Par exemple, dans un compteur binaire à dix basculeurs (pouvant donc compter de 0 à 1 023), il faudra que le basculeur B_{10} soit sensible à l'impulsion d'horloge uniquement quand les sorties Q_1, Q_2, \dots, Q_9 sont toutes hautes au moment de l'arrivée de l'impulsion. Il faudra donc commander les J et K de ce basculeur par la sortie d'une porte ET à **neuf entrées**.

Comment tourner la difficulté

On peut éviter l'emploi de portes ET avec des nombres croissants d'entrées en utilisant le montage de la figure 19. Nous avons supposé un compteur à quatre basculeurs, mais la méthode peut se généraliser pour un nombre quelconque d'étages. On voit que les entrées J et K du basculeur B_3 sont effectivement commandées par la sortie d'une porte ET P_1 à deux entrées, sortie qui n'est haute que si Q_1 et Q_2 sont hautes simultanément.

Mais, pour commander les J et K de B_4 , au lieu d'utiliser une porte ET à trois entrées, recevant Q_1, Q_2 et Q_3 , on le fait au moyen de la porte P_2 à deux entrées seulement, recevant sur une de ses entrées la sortie Q_3 et, sur l'autre, la sortie de la porte P_1 , sortie qui n'est haute que si Q_1 et Q_2 sont hautes simultanément. Donc, la sortie de P_2 ne sera haute que si Q_1, Q_2 et Q_3 sont hautes toutes les trois.

On voit que l'on utilise de même une porte P_3 à deux entrées seulement pour commander les J et K de B_5 .

Pour être franc, ce montage n'élimine pas la difficulté, il la tourne. En effet, le signal de commande des J et K de B_5 , par exemple, est affecté d'un retard. Quand, Q_2, Q_3 et Q_4 étant hautes, Q_1 passe au niveau haut, la sortie de P_3 n'en fait pas autant instantanément. Il faudra, en effet, tenir compte des temps de propagation des portes P_1, P_2 et P_3 , temps qui vont s'ajouter.

Le compteur est toujours synchrone, puisque toutes les entrées CK sont commandées simultanément, mais, quand l'impulsion n° 15 fera passer Q_1 au niveau haut (Q_2, Q_3 et Q_4 y sont déjà), la sortie de P_3 ne passera au niveau haut qu'après un temps égal à la somme des retards apportés par les portes P_1, P_2 et P_3 .

Il faudra donc que, quand la seizième impulsion arrivera (celle qui doit faire passer Q_5 au niveau haut et les quatre autres sorties au niveau bas), la commande des J et K de B_5 ait eu le temps d'arriver. Donc, l'intervalle de temps séparant l'impulsion n° 15 et l'impulsion n° 16 devra être supérieur à la somme des retards des trois portes en cascade.

On introduit donc une limitation de la réponse en fréquence du compteur. Plus il a d'étages, plus cette limitation est sévère. Par exemple, dans un compteur à dix basculeurs, nous devons tenir compte des retards de propagation cumulés de huit portes en cascade.

Si nous admettons un retard moyen de 25 ns par porte, on arrive à 200 ns. Il faudra que les impulsions d'horloge soient

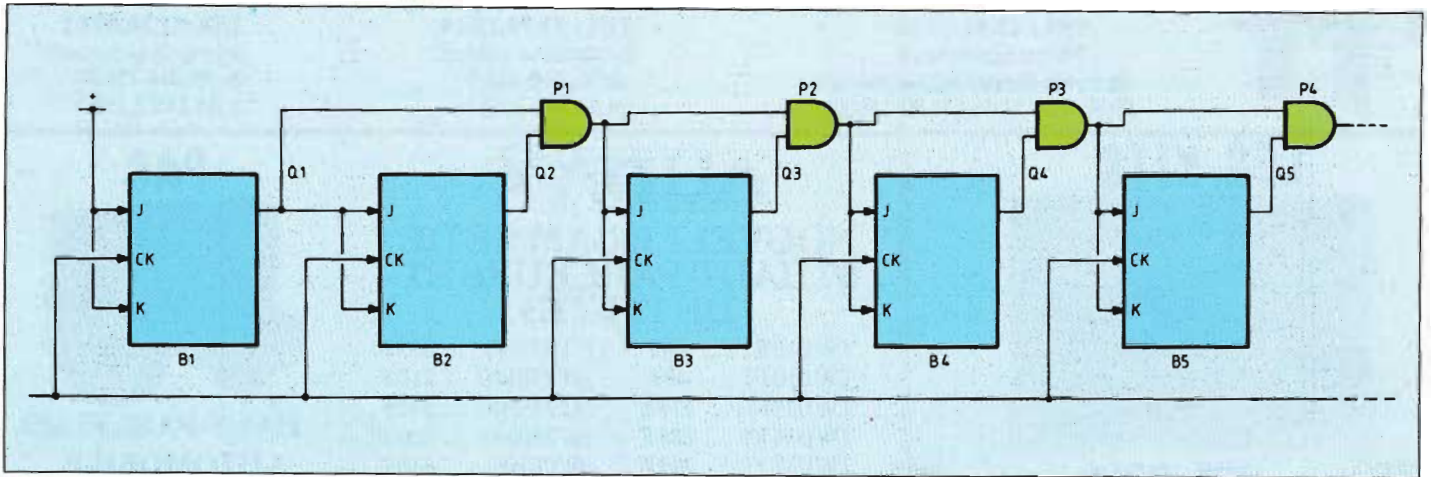


Fig. 19. — Le système de la figure 18 n'est pas applicable au-delà de deux étages. Pour un compteur binaire synchrone à plusieurs étages, il faut, normalement, des portes ET comptant de plus en plus d'entrées. Mais la disposition ci-dessus permet de tourner la difficulté, en limitant toutefois la fréquence maximale de fonctionnement.

séparées d'au moins 200 ns, ce qui limite la fréquence de comptage à 5 MHz, alors que chacun des J-K d'un circuit HEF 4027 peut monter, en général, à une fréquence de 20 MHz.

Un compteur décimal

Nous allons maintenant jouer plus subtilement avec les commandes des J et K. Nous souhaitons réaliser une « décade », c'est-à-dire un ensemble de basculeurs comptant par dix. Il nous faudra au moins quatre basculeurs, car, avec trois, on ne peut compter que jusqu'à sept. Avec quatre basculeurs, on peut compter de zéro (inclus) à quinze (inclus). Nous voulons donc que, quand l'ensemble des basculeurs est arrivé dans l'état n° 9 (en binaire 1001) l'impulsion suivante le fasse revenir à l'état zéro (0000) au lieu de la faire passer à l'état binaire 1010. Pour le moment, nous ne cherchons pas à réaliser une décade synchrone. Dans le

comptage par dix, il n'y a pas de problème pour le basculeur des unités. En effet, dix étant un nombre pair, le basculeur des unités doit changer d'état à chaque impulsion d'horloge. On met ses J et K au niveau haut, et le tour est joué.

Les choses se compliquent pour les basculeurs des deuxaines, quatraines et huitaines (B₂, B₃ et B₄). Leurs états devront se succéder ainsi (en mettant B₂ à droite et B₄ à gauche).

B4	B3	B2	
0	0	0	(état numéro zéro)
0	0	1	(numéro un)
0	1	0	(numéro deux)
0	1	1	(numéro trois)
1	0	0	(numéro quatre)
0	0	0	(retour à l'état zéro)

Comment y arriver ? C'est le moment de faire appel à notre « table de vérité » de la figure 16, à l'aide de laquelle nous allons remplir les cases de la figure 20.

Cette dernière est d'abord remplie en reportant (**en chiffres gras**) les états des trois basculeurs, tels que nous les avons indiqués ci-dessus. Sur chaque ligne, nous avons ensuite noté, pris dans la table de vérité de la figure 18, les valeurs de J et K que l'on doit avoir sur J₄ et K₄, sur J₃ et K₃, et sur J₂ et K₂, pour que la succession des états se fasse comme nous l'indique la succession des 1 et 0 en gras. Par exemple, pour les trois premières lignes des valeurs de J₄ et K₄, comme Q₄ est à 0 et y reste, nous avons indiqué, conformément à la première ligne de la table de vérité de la figure 16, que J doit être nul (0) et K indifférent (X). On pourra s'étonner que cette figure comporte six lignes. En fait, la sixième est identique à la première, mais nous l'avons tracée pour que l'on puisse déterminer plus facilement les J et K pour la cinquième ligne, car il faut, pour cela, connaître les changements des valeurs de Q depuis la cinquième ligne vers la ligne de départ. Nous avons donc répété celle-ci en dessous la cinquième ligne.

Fig. 20. — Dans ce tableau, on a d'abord noté (en bleu) les états (0 ou 1) que l'on veut obtenir sur les sorties Q₄, Q₃ et Q₂ pour faire un compteur par cinq (la sixième ligne est la répétition de la première). On en déduit alors, à l'aide de la table de la figure 16, les valeurs à donner aux J et K (1, 0 ou X, c'est-à-dire « indifférent »).

	Q ₄	J ₄	K ₄	Q ₃	J ₃	K ₃	Q ₂	J ₂	K ₂
Ligne 1	0	0	X	0	0	X	0	1	X
Ligne 2	0	0	X	0	1	X	1	X	1
Ligne 3	0	0	X	1	X	0	0	1	X
Ligne 4	0	1	X	1	X	1	1	X	1
Ligne 5	1	X	1	0	0	X	0	0	X
Ligne 6 = Ligne 1	0	0	X	0	0	X	0	1	X

Et maintenant, un peu d'astuce !

Il nous reste donc à déterminer comment nous devons commander les J et K des trois basculeurs à partir de ce que nous venons de remplir sur la figure 20. Nous avons, en effet, la possibilité de remplacer tout X (indifférent) soit par 0, soit par 1, et il faudra le faire de telle sorte que la

