

# EXPERIMENTATION ET EVOLUTION DES CIRCUITS FONDAMENTAUX

## LES C-MOS : du logique à l'analogique

Les circuits logiques C-MOS se distinguent, du moins dans certaines conditions d'emploi que nous précisons, par leur très faible consommation, et par leur aptitude à fonctionner sous des tensions d'alimentation aussi réduites que 3 volts. Largement exploitées dans les applications numériques, ces propriétés peuvent s'étendre, aussi surprenant qu'il y paraisse, au domaine de l'analogique. Les portes remplacent alors des amplificateurs opérationnels, et autorisent la conception d'équipements portatifs, et à très large autonomie.

### RAPPELS SUR LA STRUCTURE D'UNE PORTE C-MOS

Une porte élémentaire (figure 1) résulte de l'association de deux transistors MOS complémentaires, à enrichissement : l'un à canal P, l'autre à canal N.

Discutons, immédiatement, le problème des notations, qui diffèrent avec les constructeurs, et peuvent conduire à des quiproquos. Dans la figure 1, la porte est alimentée entre la masse et une tension positive, respectivement notées GND (pour « ground ») et  $V_{CC}$ . Certains constructeurs retiennent les symboles  $V_{SS}$  et

$V_{DD}$ , par assimilation aux transistors MOS isolés, et polarisés par la source (SS) et le drain (DD). Nous choisirons ici la première solution, qui nous semble plus logique, puisque masse et pôle positif sont tous les deux reliés à des sources.

La théorie de fonctionnement des transistors MOS étant supposée connue, nous passerons directement à la courbe de transfert de la porte schématisée en figure 1, qui en découle, et dont nous rappelons l'allure à la figure 2. Au voisinage de zéro, ou de  $V_{CC}$ , le canal N dans le premier cas, et le canal P dans le deuxième, restent bloqués, leur différence de potentiel grille-source  $V_{GS}$  n'atteignant pas la tension de seuil : la

porte ne conduit pas, et la tension de sortie  $V_s$  reste, elle, à  $V_{CC}$ , ou à zéro.

Dès que le potentiel d'entrée  $V_e$  dépasse, pour l'un ou l'autre transistor, le seuil  $V_T$ , la porte entre en conduction. En

supposant symétriques les deux éléments, ce qui est pratiquement le cas, la courbe de transfert entrée/sortie offre, elle aussi, une symétrie par rapport au point d'abscisse et d'ordonnée  $V_{CC}/2$ .

### CARACTERISTIQUES D'ENTREE ET FONCTIONNEMENT LOGIQUE

Lors de leur utilisation dans les circuits numériques, entrées et sorties des portes C-MOS évoluent, normalement, entre les potentiels  $V_{GND}$  et  $V_{CC}$ , qui constituent les états logiques

« 0 » et « 1 ». Le reste de la courbe de transfert, dont le parcours représente évidemment un passage obligé de l'une à l'autre extrémité, n'intervient que pendant de brè-

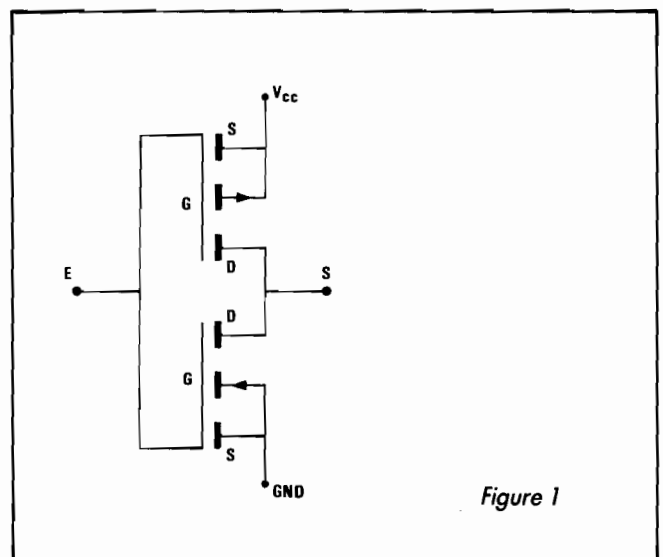


Figure 1

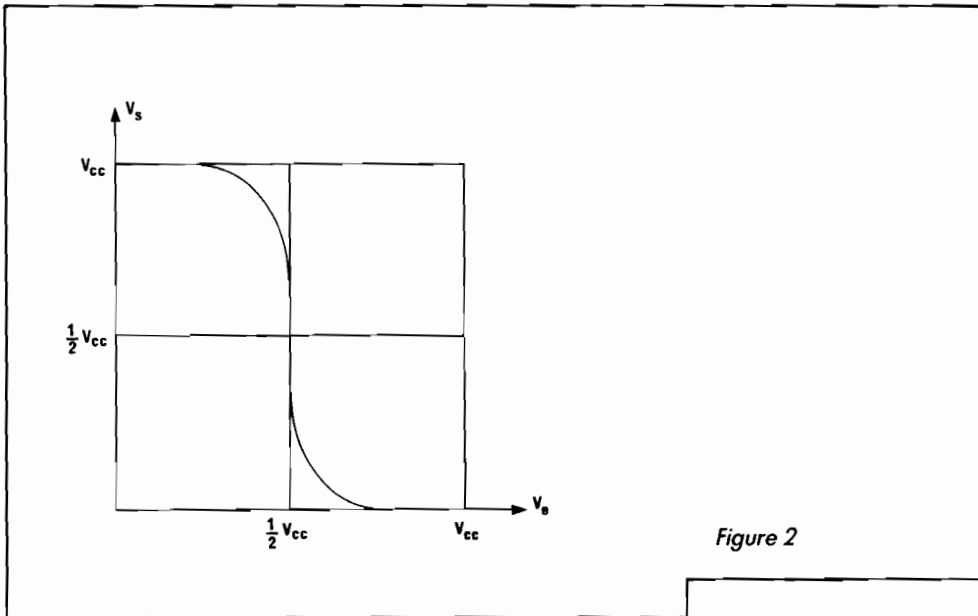


Figure 2

ves durées transitoires. Ici interviennent les temps de montée et de descente, ainsi que les délais de propagation. Ils intéressent les applications logiques, et nous n'en traiterons pas dans cet article. Par contre, une caractéristique importante nous concerne maintenant : l'impédance d'entrée, toujours extrêmement élevée. Elle résulte, en effet, de la mise en parallèle d'une résistance d'environ  $10^{12} \Omega$ , et d'une capacité voisine de 5 pF seulement.

## DU LOGIQUE A L'ANA-LOGIQUE : BOUCLAGE D'UNE PORTE C-MOS

Dans la figure 3, une résistance  $R$ , que nous supposons très faible vis à vis de la résistance d'entrée de la porte (ce qui permet encore des dizaines ou des centaines de mégohms !), relie la sortie à l'entrée. Compte tenu de l'impédance de cette dernière,  $R$  se comporte, ici,

comme un simple court-circuit, tout au moins vis à vis du continu : elle impose donc l'égalité des tensions  $V_e$  et  $V_s$ . Or, la courbe de transfert de la figure 2 montre qu'il n'existe qu'une valeur permettant cette égalité : c'est la moitié de la tension d'alimentation, soit  $V_{cc}/2$ .

Ainsi le bouclage d'une porte élémentaire C-MOS sur elle-même assure-t-il la polarisation automatique à la moitié de la tension d'alimentation. Il devient tentant d'examiner ce qui se passe, maintenant, si on impose, à l'entrée, des variations de potentiel introduites par un signal externe : n'est-ce pas ce qu'on réalise

d'ordinaire avec un amplificateur opérationnel, et qui nous conduit, ainsi, à nous inspirer des montages retenus dans ce cas ?

## LA PORTE C-MOS UTILISEE EN AMPLIFICATEUR

Le montage, illustré par la figure 4, est bien voisin de celui de l'amplificateur inverseur traditionnel, sauf qu'il exploite une simple porte C-MOS inverseuse (par exemple, l'une des six portes d'un circuit inté-

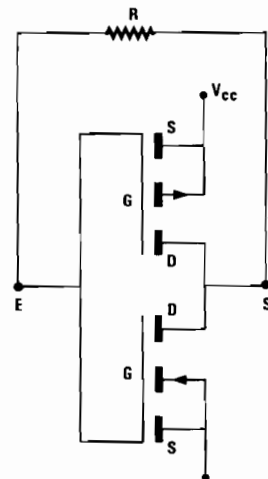


Figure 3

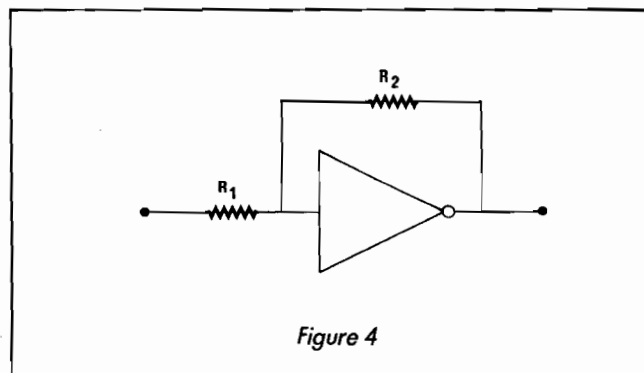


Figure 4

gré 4069). On remarquera, conformément à ce que nous venons d'expliquer, l'inutilité de polariser le circuit par une deuxième entrée... d'ailleurs inexistante.

L'explication du fonctionnement d'un amplificateur inverseur à ampli opérationnel, supposé idéal, repose sur deux caractéristiques de ce composant : sa grande impédance d'entrée (le courant qui circule dans  $R_1$  traverse alors intégralement  $R_2$ ), et son gain

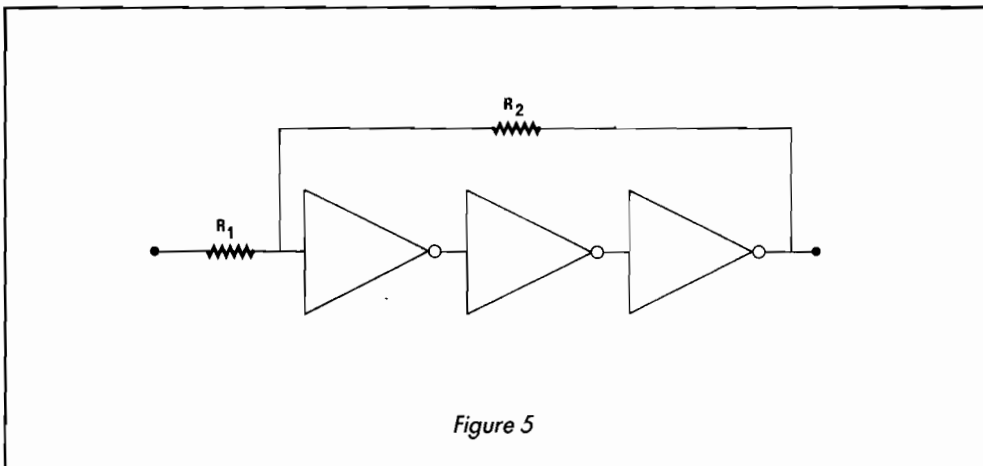


Figure 5

élevé en boucle ouverte, grâce auquel le gain en boucle fermée,  $A_v$ , ne dépend que de  $R_1$  et de  $R_2$  :

$$A_v = \frac{R_2}{R_1}$$

La première condition est particulièrement bien remplie, puisque nous atteignons  $10^{12} \Omega$ . Il en va un peu moins

bien, malheureusement, pour la deuxième. On trouve, en effet, des gains (en continu ou basse fréquence) de 55 dB environ pour une alimentation sous 3 volts, 40 dB sous 5 volts, 30 dB sous 10 ou 15 volts, contre 100 dB pour la plupart des amplificateurs opérationnels.

Le remède, heureusement, est très simple : il suffit de brancher plusieurs portes en cascade (en nombre impair pour conserver l'inversion, indispensable). Ainsi, avec trois portes, on atteint, dans le cas le plus défavorable, un gain de 90 dB, qui devient comparable à celui d'un amplifica-

teur opérationnel. Le montage, illustré par la figure 5, n'accapare que la moitié d'un circuit 4069, ou 74C04.

## LA REPONSE EN FREQUENCE

Elle dépend de la tension d'alimentation, et s'améliore, vers les fréquences élevées, lorsque  $V_{cc}$  croît. Les courbes de la figure 6 explicitent les réponses en boucle ouverte, pour quatre valeurs de la tension d'alimentation. Elles montrent qu'il est facile d'atteindre, en boucle fermée, des bandes passantes égales, voire supérieures, au mégahertz.

## ASSOCIATION DES AMPLIFICATEURS OPERATIONNELS ET DES C-MOS

En raison des caractéristiques de saturation de l'étage de sortie – presque toujours de structure push-pull –, un amplificateur opérationnel n'offre, généralement, qu'une excursion, crête à crête, inférieure de deux à trois volts à sa tension d'alimentation totale. Au contraire, comme nous l'avons vu plus haut, l'excursion d'une porte C-MOS approche de quelques millivolts la tension  $V_{cc}$ .

Il peut être intéressant, alors, d'associer ces deux types de composants, pour bénéficier à la fois d'un gain élevé, et d'une grande excursion de sortie. La figure 7 propose un exemple de ce type de montage, dont l'intérêt se révélera d'autant plus grand qu'on utilisera, en A, un amplificateur opérationnel à faible consommation, et acceptant de travailler sous des tensions réduites (TLC 252 double, TLC 254 quadruple, LM4250, etc.).

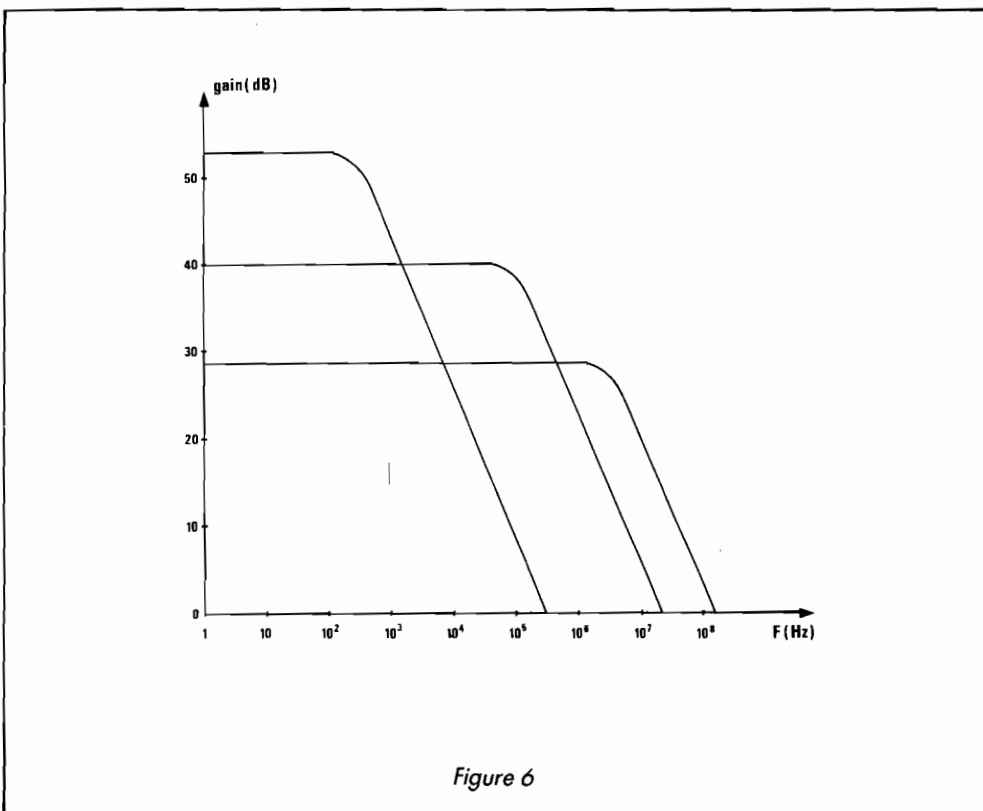


Figure 6

## AUGMENTATION DU COURANT DE SORTIE

Une porte inverseuse accepte des courants de sortie voisins de 5 mA. Des portes NAND (il suffit de réunir les deux entrées pour en faire des inverseurs) peuvent fournir chacune 10 mA, à partir de  $+V_{CC}$ . Des portes NOR atteignent les mêmes intensités, à partir de la masse, ou d'une source négative. On peut alors obtenir une sortance élevée, à l'aide d'associations en parallèle de ces deux types de portes. La figure 8 fournit un exemple d'application, à l'aide d'un circuit 74C00 (quatre NAND à

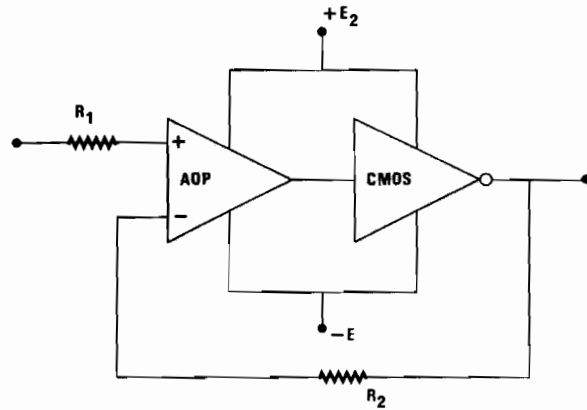


Figure 7

double entrée), et d'un 74C02 (quatre NOR à double entrée). On bénéficie de l'excursion des C-MOS, avec un courant de sortie supérieur à 40 mA.

## CONCLUSION

L'emploi des circuits intégrés C-MOS en régime linéaire ouvre la voie de réalisations comparables à celles que permettent les amplificateurs opérationnels. Les avantages résident dans de très faibles consommations (en basse fréquence, et sans tenir compte de la charge, elles n'excèdent pas une dizaine de nanowatts par porte), dans la possibilité de travailler avec des tensions d'alimentation réduites, et dans une excursion de sortie égale à la tension d'alimentation.

R. RATEAU

Figure 8

