

PRATIQUE DE L'ELECTRONIQUE (7^e PARTIE)

Les circuits linéaires

Après avoir commencé à aborder, dans notre précédent numéro, l'aspect réellement pratique des circuits linéaires, nous allons, aujourd'hui, voir comment mesurer le « slew rate » et faire quelques rappels sur les deux montages de base, à gain positif et à gain négatif.

Comment mesurer le « slew rate »

Il y a, malheureusement, bien des cas où les constructeurs n'indiquent pas cette vitesse maximale de montée de la tension de sortie (ou « slew rate ») pourtant si utile à connaître.

Si vous disposez d'un oscilloscope, vous la mesurerez facilement. Il suffit d'envoyer à l'amplificateur opérationnel une tension en signaux carrés, comme le montre la figure 42.

On emploie une des quatre portes « Nand Schmitt » d'un HEF 4093, montée en générateur de signaux carrés et donnant une fréquence voisine de 200 kHz (à noter les six entrées à connecter à la masse, en plus de la broche 7, car il ne faut pas laisser une entrée « en l'air » dans un circuit CMOS).

On les transmet par C_2 - R_2 à l'entrée « + » de l'amplificateur opérationnel AO à tester, dont l'entrée « - » est à la masse (pour cet essai, il est préférable d'utiliser une alimentation en ± 12 V de AO).

On trouve alors, en sortie de AO, des signaux « trapézoïdaux », dont il suffit de mesurer la pente sur l'oscilloscope.

Signalons que, dans le cas d'un amplificateur opérationnel du type « son et lumière » (dans le genre du μA 741), il vaut mieux diminuer la fréquence de l'oscillateur à HEF 4093. En effet, avec

une montée à la « vitesse » (si on ose parler de vitesse, il vaudrait mieux dire « à la lenteur ») de 0,2 V/ms, la tension de sortie met 100 μs pour monter de -10 V à +10 V (pour la même montée, un TL 082 ne demande que 1,5 μs).

On arrive facilement à réduire la fréquence de l'oscillateur à 5 kHz, en portant la capacité du condensateur C_1 à 3,9 nF.

Quelques derniers détails

Nous en avons pratiquement terminé avec l'étude théorique de l'amplificateur opérationnel. Il reste seulement à indiquer quelques précisions importantes dans l'emploi de ce composant si utile.

D'abord, on a souvent des mécomptes dans son emploi, parce que l'on a négligé un point important : la self-induction parasite des connexions.

On imagine souvent que, comme on a relié les connexions $VS+$ et $VS-$ de l'amplificateur opérationnel aux sorties +12 V et -12 V d'une bonne alimentation régulée, tout va pour le mieux. Or on oublie souvent que les fils de

connexion présentent un coefficient de self-induction parasite qui est souvent à l'origine d'ennuis (entrée en oscillation de l'amplificateur, etc.).

Il est extrêmement facile de se débarrasser de tous les problèmes de ce type, tout simplement en connectant, aussi près que possible de l'amplificateur opérationnel, deux petits condensateurs, d'une capacité allant de 10 à 100 nF, entre le $VS+$ et la masse d'une part, entre le $VS-$ et la masse d'autre part (fig. 43).

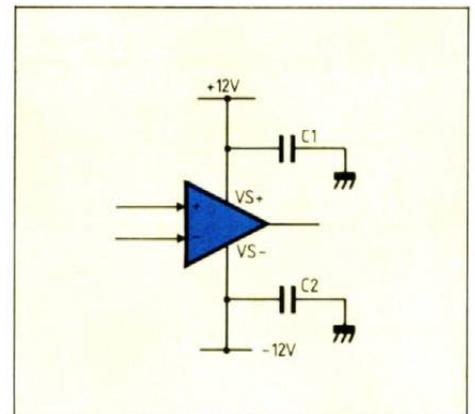


Fig. 42. — Une porte NAND-Schmitt montée en oscillateur, commande, en saturation, l'amplificateur opérationnel AO.

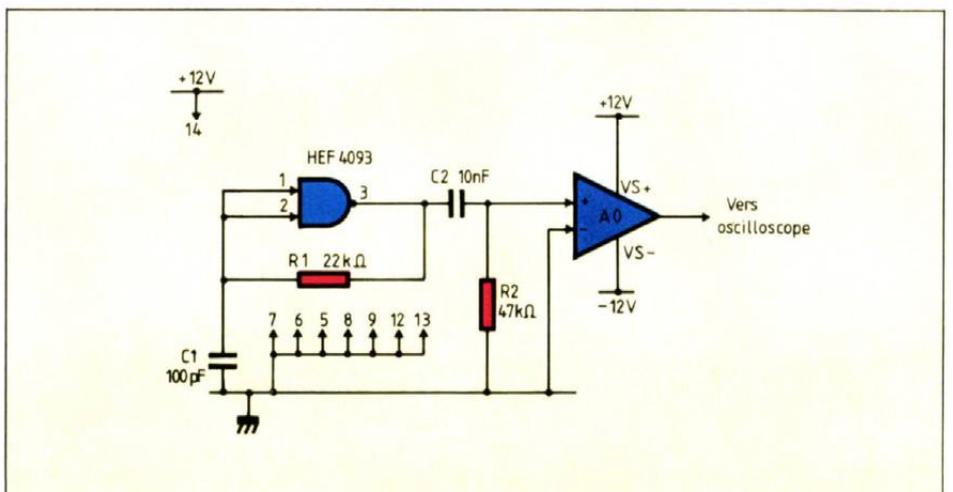


Fig. 43. — Il est toujours prudent de monter, à proximité d'un amplificateur opérationnel, deux condensateurs découplant les + et les - de l'alimentation.

Dans le cas d'un circuit imprimé, qui comporte plusieurs boîtiers d'amplificateurs opérationnels, il est quelquefois recommandé de prévoir, pour chaque boîtier, un jeu de deux condensateurs de ce type. C'est peut-être un peu « luxueux », mais « trop fort n'a jamais manqué ».

Ensuite, il y a des cas où un amplificateur opérationnel peut se « fâcher », en particulier, si l'on charge sa sortie par un condensateur de capacité trop grande, et surtout par un câble coaxial non adapté.

Les réflexions... de mauvais goût

Revenons sur ce dernier point. L'auteur, qui voue une haine inextinguible à la résistance interne des sources, avait voulu, ayant réalisé un générateur de fonction économique (mais bien pratique : il faudra un de ces jours le décrire ici) voulait que la résistance interne de sortie dudit générateur soit *nulle*, et a donc, pour cela, prévu un amplificateur opérationnel de gain unité en sortie.

Une série d'essais sur ledit générateur persuada l'auteur que l'engin était « parfait » (il faut toujours commencer par des « autoccompliments », si on veut que les autres vous suivent).

Oui mais... le générateur fut utilisé, quelques mois plus tard, pour envoyer son signal dans un câble coaxial de 1,5 m de longueur. Normalement, un tel câble représente une capacité de l'ordre de 120 pF, et le générateur avait montré qu'il supportait gentiment d'être chargé, à sa sortie, par des condensateurs d'une capacité allant à 300 pF.

Et, là, ce fut la pagaille la plus noire (la plus verte, devrait-on dire, en regardant à l'oscilloscope ce qui se passait). Une oscillation à plus de 1 MHz sortait du générateur, lequel aurait dû donner du 7 kHz.

L'amplificateur opérationnel de sortie avait trouvé tout à fait incorrect le fait de la connecter ainsi à un câble, ouvert aux deux bouts (entendez par là qu'il n'avait pas de résistor d'adaptation).

Or, un coaxial ouvert se comporte, en première approximation seulement, comme un condensateur (environ

80 pF/m pour le câble classique). En fait, c'est plus complexe. Comme il n'a pas de charge au bout, quand on envoie un signal à une extrémité, ce signal se propage, arrive au bout « à vide » et donne alors un « écho », autrement dit une réflexion.

Cet écho se propage à son tour dans le coaxial, revient au point de départ, et arrive au générateur de signal. La vitesse de propagation dans un coaxial est environ de 20 cm/ns, donc, pour aller et revenir dans un coaxial de 1,5 m, cela fait environ 15 ns.

Cela suffisait pour faire entrer l'amplificateur opérationnel en oscillation.

Première idée : « Il faut adapter le coaxial, au moins à un bout. » En effet, un coaxial à un bout duquel on a connecté un résistor « de charge », dont la résistance est égale à l'impédance caractéristique du coaxial, se comporte, vu de l'entrée, comme un résistor.

Autrement dit, avec du coaxial ayant 75 Ω d'impédance caractéristique, si vous connectez un résistor de 75 Ω à un bout, et que vous faites des mesures à l'autre bout, il se comportera comme un résistor pur, d'une résistance de 75 Ω.

Donc, aussitôt pensé, aussitôt fait. Le résistor de 75 Ω arrangea un peu les choses, mais, si l'on poussait la tension de sortie du générateur à plus de 1 V rms (soit $\pm 1,4$ V crête), cela représen-

tait une intensité crête de près de 19 mA, un peu trop pour l'amplificateur opérationnel.

La double adaptation

Les gens convenables, quand ils utilisent un coaxial, pratiquent la « double adaptation », comme le montre la figure 44.

Il y a bien, en sortie, un résistor R_2 , de résistance égale à l'impédance caractéristique du câble, mais on a, en plus, prévu que le générateur qui alimente le câble devrait avoir une résistance interne égale, elle aussi, à cette impédance caractéristique.

Donc, si le générateur G est un de ceux que l'auteur aime (ayant une résistance interne *nulle*), il faut ajouter, en série avec lui, un résistor R_1 , de résistance égale à l'impédance caractéristique.

Pour la haute fréquence, une telle adaptation est pratiquement indispensable, mais, dans le cas du générateur en question, elle avait été jugée inacceptable, l'auteur ayant formellement refusé d'introduire une résistance interne « avec préméditation et un fer à souder » comme aurait dit Pierre Dac.

Résistance interne : « TOTO.PAS »

Pour l'auteur de ces lignes, augmenter ainsi la résistance interne aurait paru

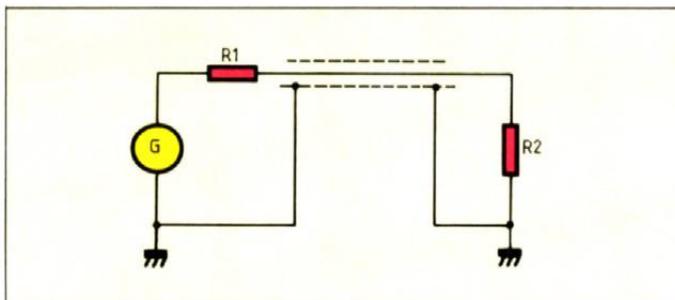


Fig. 44. – Si un câble coaxial est « chargé » en bout par un résistor R_2 de résistance égale à l'impédance caractéristique du câble, ce dernier se présente, à son entrée, comme un résistor pur.

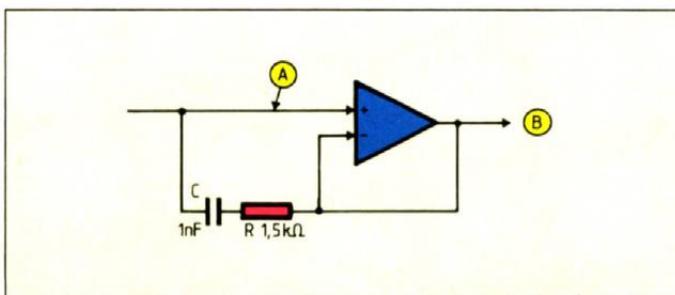


Fig. 45. – Quand un amplificateur opérationnel est chargé par une impédance capacitive, et tend, de ce fait, à entrer en oscillations, on peut le « calmer » par l'ensemble R-C entre sortie et entrée.

aussi affreux que le fait d'appeler « TOTO » un programme informatique, ce qui est malheureusement l'habitude (déplorable) des informaticiens, même de ceux de grande classe, comme le fils de l'auteur.

Heureusement, la solution du problème fut donnée à l'auteur par un de ses amis : on calme beaucoup la tendance à l'oscillation d'un amplificateur opérationnel monté en « suiveur » (gain unité) en plaçant, comme l'indique la figure 45, un condensateur de 1 nF en série avec un résistor de 1,5 kΩ, entre l'entrée « + » et l'entrée « - » (c'est-à-dire la sortie).

Dans les conditions normales de fonctionnement, c'est-à-dire quand le potentiel du point (B) suit rigoureusement celui du point (A), l'ensemble R-C ne joue aucun rôle. Quand les effets perturbateurs interviennent, il calme nettement la tendance de l'amplificateur opérationnel à entrer en oscillation.

Dans tous les cas, si l'on n'est pas préoccupé au premier chef par la réduction (à zéro si possible) de la résistance interne, la solution classique pour éviter les ennuis avec un amplificateur opérationnel consiste à placer, en série avec la sortie, un résistor (100 à 500 Ω).

A ce moment, les effets pernicioeux d'une charge capacitive ou, pis, d'un coaxial ne se feront plus sentir. Mais on perdra cet avantage, qui nous semble « fabuleux », de la résistance de sortie nulle.

Ose-t-on rappeler les deux montages de base ?

Selon l'expression classique « il est à peine besoin de rappeler que... » (c'est ce que l'on dit toujours avant de rappeler la chose en question), il n'est donc presque pas nécessaire de rappeler les deux montages de base, qui, utilisant des amplificateurs opérationnels, permettent de multiplier une tension par un nombre fixe.

La figure 46 les représente. En (a), nous avons un montage à gain positif, la tension de sortie V_0 étant le produit de la tension d'entrée e par le facteur k . Notez bien que le résistor R_2 a pour résis-

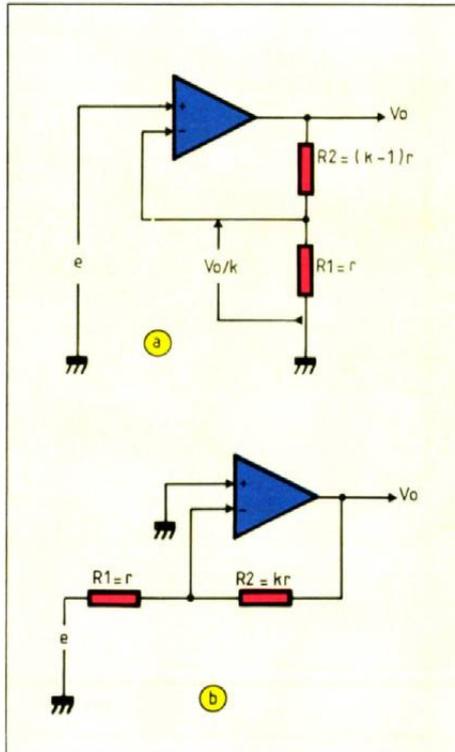


Fig. 46. - L'amplificateur opérationnel peut amplifier une tension de deux façons.

tance $(k-1)$ fois celle de R_1 . Le montage 46 (b) a un gain négatif, la tension de sortie V_0 et en opposition de phase avec e , le gain (en valeur absolue) est égal au rapport des résistances des deux résisteurs.

Il y a, en plus du signe de l'amplification, deux différences fondamentales entre ces montages.

D'abord, le *gain minimal* (en valeur absolue). Ce dernier est toujours supérieur ou égal à l'unité dans le cas du montage

(a). Il est pratiquement égal à 1 si l'on élimine R_1 (on rend sa résistance infinie, ce qui se fait en la retirant du montage), et, de préférence, en remplaçant R_2 par un court-circuit.

Le gain du montage (a) n'est jamais inférieur à l'unité.

A l'opposé, la valeur absolue du gain, pour le montage (b) peut être quelconque, inférieure à l'unité si l'on veut. Il convient de noter que, pour avoir un gain de -1 exactement, il faut avoir deux résisteurs R_1 et R_2 ayant exactement la même résistance.

Ensuite la *résistance d'entrée* est :

- pratiquement infinie pour (a) ;
- faible et égale à r pour (B).

En fait, dans les deux montages, l'amplificateur opérationnel agit selon la « règle d'or », en maintenant toujours le potentiel de son entrée « - » à la même valeur que celui de son entrée « + ». En (a), cette valeur est la tension d'entrée e , en (b), cette valeur est zéro (le potentiel de la masse).

Réduction des termes parasites

Donc, l'amplificateur opérationnel agit en réduisant (pratiquement à zéro) la différence qui pourrait exister entre la tension d'entrée et le quotient par k de la tension de sortie.

On retrouve tout à fait la même conception dans le « détecteur parfait ». Il s'agit là de corriger un défaut des diodes.

Une diode devrait être « du mica dans un sens, du cuivre dans l'autre ». Tra-

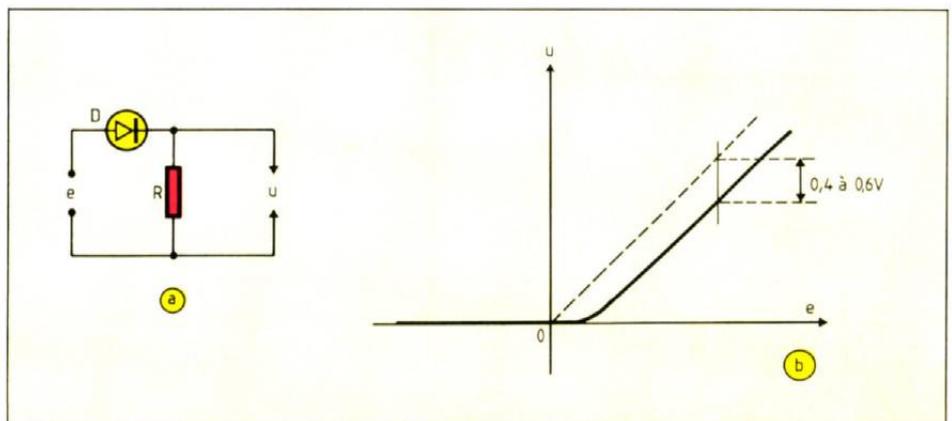


Fig. 47. - Le circuit détecteur (a) n'est pas parfait, comme le montrent les courbes (b), en raison de la chute de tension minimale requise par une diode pour être passante.

duisez que, dans le sens bloqué, la diode devrait être un parfait isolant, comme le mica, et, dans le sens passant, la diode devrait faire ignorer son existence, en conduisant le courant comme le ferait un fil de cuivre.

Or, une diode se comporte tout à fait comme il faut en ce qui concerne « le mica », mais dans le sens direct, elle est loin de remplacer « du cuivre ». Il faut, en effet, une certaine chute de tension directe (au moins 0,4 V, souvent 0,6 V) pour que le courant passe bien dans le sens direct.

C'est cette tension directe « parasite » qui fait que les voltmètres alternatifs « passifs » (sans amplification) ont une échelle qui n'est pas du tout linéaire. Pour un instrument déviant à fond pour une tension de 3 V, par exemple, une tension de 1 V provoque une déviation de plus de 50 % de la totalité de l'échelle.

Autrement dit, appliquez au « circuit détecteur » de la figure 47 (a) une tension e , sa tension de sortie, « s » sera celle qu'indique en trait plein la courbe de la figure 47 (b), alors que l'on souhaitait avoir la courbe en traits pointillés, soit :

$$s = 0 \text{ pour } e < 0$$

$$s = e \text{ pour } e > 0$$

On obtiendra un résultat tout à fait conforme à la courbe en pointillé de la figure 47 (b) au moyen du montage de la figure 48.

Dans un tel montage, puisque la diode a un courant inverse que l'on peut considérer comme rigoureusement nul, la tension de sortie ne peut être que nulle ou positive, mais jamais négative.

Elle sera positive uniquement si e est positive. Mais alors, malgré la présence de la diode, l'amplificateur opérationnel va maintenir le potentiel du point (A), et non celui du point (B) à la valeur e . Donc, cet amplificateur fera ce qu'il faut, en (B), pour éliminer la tension parasite directe de la diode.

En gros, tout se passe comme si l'on avait affaire à une diode dont la tension parasite directe aurait été divisée par le gain en boucle ouverte de l'amplificateur opérationnel. Comme ce dernier est énorme, nous avons réalisé ainsi une « détection parfaite » (mais elle est mono-alternance).

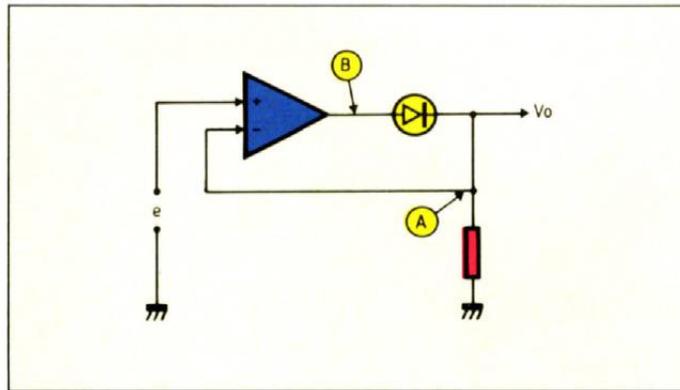


Fig. 48. – En utilisant un amplificateur opérationnel, on fait en sorte que le potentiel du point (A) soit rigoureusement égal à e quand e est positif et nul quand e est négatif. On a réalisé ainsi une détection parfaite.

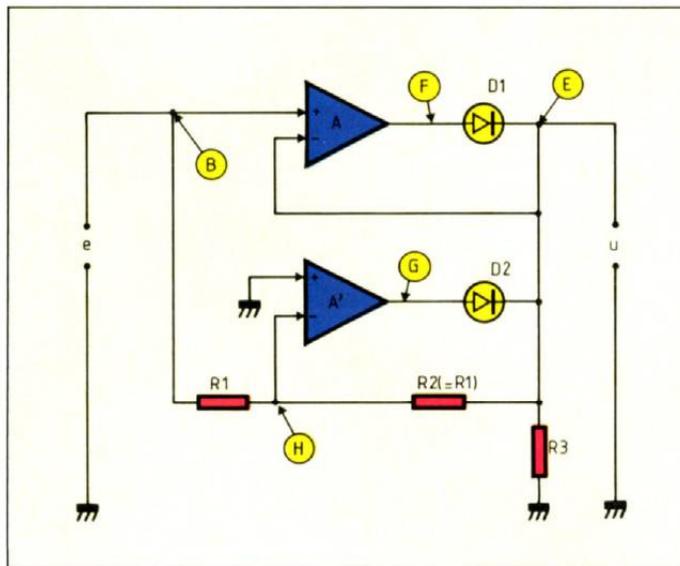


Fig. 49. – Avec deux amplificateurs opérationnels, on peut réaliser une détection « parfaite » à deux alternances. Quand e est positif, c'est A qui fait en sorte que le potentiel de (E) suive exactement celui de (B), A' étant bloqué. Quand e est négatif, c'est A', de gain -1 , qui amène le potentiel de (B) à être égal à la valeur absolue de celui de (E).

Les deux alternances

Si nous voulons que la détection fonctionne aussi pour les alternances négatives, il faudra perfectionner le montage de la figure 48. Il existe de nombreux montages de détection à deux alternances utilisant des amplificateurs opérationnels, mais nous allons étudier celui de la figure 49, car il présente des particularités intéressantes.

Le résistor R_3 y joue le même rôle que R dans le montage de la figure 48 : il fixe le potentiel du point (E) à zéro quand les deux diodes sont bloquées.

Supposons, par exemple, que la tension d'entrée e soit positive, portant le point (B) à +1 V par rapport à la masse. L'amplificateur opérationnel A va intervenir, portant le point (E) au même potentiel que celui de (B), comme nous l'avons déjà vu plus haut.

Il ne passe donc aucun courant dans R_1 ni dans R_2 , puisque les points (B) et (E)

sont au même potentiel. Le point (H) est aussi à +1 V, donc A' est totalement saturé, le potentiel du point (G) est « en butée basse », aussi bas que A' peut le porter.

Maintenant, que va-t-il se passer si e est négative, portant, par exemple, le potentiel du point (B) à -2 V ?

L'amplificateur opérationnel A' peut maintenant intervenir. Pour maintenir le potentiel du point (H) [son entrée « $-$ »] à la même valeur que celui de son entrée « $+$ » (la masse), il portera le point (G) à un potentiel de l'ordre de +2,6 V, de telle sorte que le potentiel de (E) soit exactement +2 V.

Pendant ce temps, l'amplificateur opérationnel A va se trouver totalement en butée basse, puisque son entrée « $-$ » est à +2 V et que son entrée « $+$ » est à -2 V. Le point (F) sera donc aussi négatif que l'amplificateur opérationnel le permet.

(à suivre)

J.-P. Cehmichen