

EXPERIMENTATION ET EVOLUTION DE CIRCUITS FONDAMENTAUX

Les revues techniques – et la nôtre particulièrement – proposent régulièrement à leurs lecteurs des réalisations dans les domaines de la mesure, de l'électronique domestique, de la HiFi, etc. Chaque schéma correspond, naturellement, à un objectif bien particulier, qui détermine ses caractéristiques. Il ne satisfait pas toujours les besoins précis de tous les utilisateurs. En ouvrant cette nouvelle rubrique, nous es-

pérons aider nos lecteurs à modifier et à faire évoluer un circuit déterminé, partie d'un montage ou d'un schéma d'application, pour l'adapter à d'autres impératifs. Il ne s'agit donc pas ici de réalisations, mais d'études à la fois théoriques (toujours simples) et surtout pratiques. On pourra, éventuellement, les expérimenter sur des plaquettes d'essai, ou sur des boîtes de câblage sans soudure.

D'un multivibrateur à l'autre

ANALYSONS LE SCHEMA

Le circuit intégré CI, amplificateur opérationnel de type LM741 (fig. 1), est alimenté sous deux tensions symétriques par rapport à la masse, + E et - E, de 12 V. On a donné aux divers composants les valeurs suivantes :

$$\begin{aligned} R_1 &= 100 \text{ k}\Omega \\ R_2 = R_3 &= 270 \text{ k}\Omega \\ C &= 47 \text{ nF} \end{aligned}$$

Nous noterons respectivement e_A et e_B les tensions, comptées par rapport à la masse, sur l'entrée non inverseuse (+) et sur l'entrée inverseuse (-), et e_S la tension de sortie. Analysons le fonctionnement, en nous référant aux diagrammes de la figure 2.

A la mise sous tension ($t = 0$), le condensateur C est déchargé, donc $e_B = 0$. En raison du gain différentiel extrêmement élevé de l'amplificateur (environ 25 000), il suffit d'une différence de potentiel très faible – une fraction de millivolt – entre les entrées + et -, pour conduire à la saturation. Or, cette différence de potentiel existe inévitablement, à cause du bruit dans les divers composants. La sor-

Le point de départ choisi, un très classique multivibrateur astable, est construit autour d'un amplificateur opérationnel universellement répandu. Sur sa sortie S, il délivre, à une fréquence d'environ 100 Hz, des créneaux symétriques.

Après une brève analyse du fonctionnement de ce circuit, et de ses limites, nous nous proposons d'y apporter progressivement des modifications, en vue de changer sa fréquence d'oscillation, la forme des signaux obtenus (impulsions positives ou négatives), et même d'élaborer des ondes triangulaires quasi parfaites.

tie e_S passe donc immédiatement soit à + E, soit à - E. Supposons que $e_S = + E$. On trouve alors instantanément, au point A, le potentiel :

$$e_{A+} = \frac{R_3}{R_2 + R_3} E = \frac{E}{2} = 6 \text{ V}$$

ce qui verrouille la sortie au potentiel + E. Dans ces conditions, le condensateur C se charge exponentiellement à travers R_1 , et e_B tend vers + E. Mais, lorsque e_B atteint la valeur e_{A+} , la sortie bascule vers - E. Aussitôt, le potentiel en A devient :

$$e_{A-} = - \frac{R_3}{R_2 + R_3} E = - 6 \text{ V}$$

et le condensateur se décharge exponentiellement à travers R_1 . Lorsque e_B atteint e_{A-} , la sortie e_S bascule à nouveau vers + E, et le condensateur recommence à se charger, jusqu'à l'inversion suivante.

Finalement, comme le montre la figure 2, la tension e_B affecte la forme de dents de scie exponentielles, évoluant entre les limites e_{A-} et e_{A+} . Simultanément, on recueille, à la sortie e_S , des créneaux dont les paliers se situent à + E et - E.

Nous épargnerons à nos lecteurs le calcul de la période T,

dont on trouvera le détail dans tous les manuels. On trouve :

$$T = 2 R_1 C \ln \frac{R_2 + 2 R_3}{R_2}$$

soit, compte tenu des valeurs numériques de R_2 et de R_3 :

$$T = 2,18 R_1 C$$

Avec $R_1 = 100 \text{ k}\Omega$ et $C = 47 \text{ nF}$, il vient :

$$T = 10,20 \text{ ms et } F = \frac{1}{T} = 98 \text{ Hz}$$

L'oscillogramme A, relevé sur le circuit de la figure 1, et avec les valeurs de composants indiquées, montre les dents de scie e_B , et les créneaux e_S . On remarque que l'amplitude des créneaux n'atteint qu'à peine 20 V, au lieu des 24 V prévus : ceci est dû aux tensions de déchet (1 à 2 V), qui limitent l'excursion en sortie.

ESSAYONS LES TRES BASSES FREQUENCES

Notre première hypothèse sera qu'à partir du montage de la figure 1 le lecteur désire construire un oscillateur très

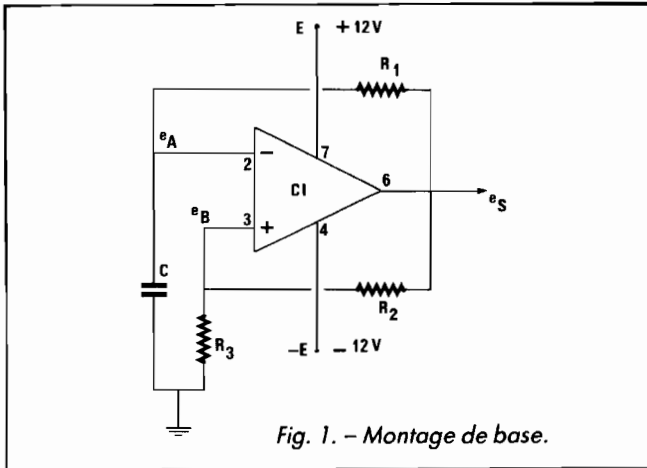


Fig. 1. - Montage de base.

lent, par exemple pour réaliser un clignotant à diode électroluminescente. La période T étant proportionnelle à la constante de temps RC , on peut augmenter R , ou C , ou les deux. Il existe pourtant des limites :

● **Augmentation de C**

La différence de potentiel aux bornes de C prend alternativement des valeurs positives et négatives, ce qui exclut l'emploi d'un condensateur électrolytique, polarisé. En pratique, on se trouvera donc limité à :

$C = 1 \mu F$

● **Augmentation de R**

Sur ses entrées, l'amplificateur opérationnel consomme un courant de polarisation (voir tableau en fin d'article), qui peut atteindre $0,5 \mu A$ dans le cas du LM741, et qui se soustrait du courant de charge (ou s'ajoute au courant de décharge) traversant R_1 . Pour que le fonctionnement reste possible, le courant de polarisation doit rester faible (10 % par exemple), par rapport au courant dans R_1 . Or, la tension aux bornes de cette résistance descend (compte tenu du déchet) à 5 V environ, aux sommets des dents de scie. Pour qu'il y circule au moins $5 \mu A$, on doit limiter R_1 à $1 M\Omega$.

Dans ces conditions, on voit que la période maximale pos-

sible se situe aux alentours de :

$$T = 2,18 s$$

Pour l'augmenter, il faut choisir un amplificateur opérationnel à très faible courant de polarisation : c'est le cas des amplis Bi-FET, comme le LF356, que nous utiliserons plus loin.

UTILISONS UNE ALIMENTATION UNIQUE

Il n'est pas toujours commode d'employer une alimentation double symétrique : ce serait le cas, par exemple, pour un clignotant à LED alimenté sur pile.

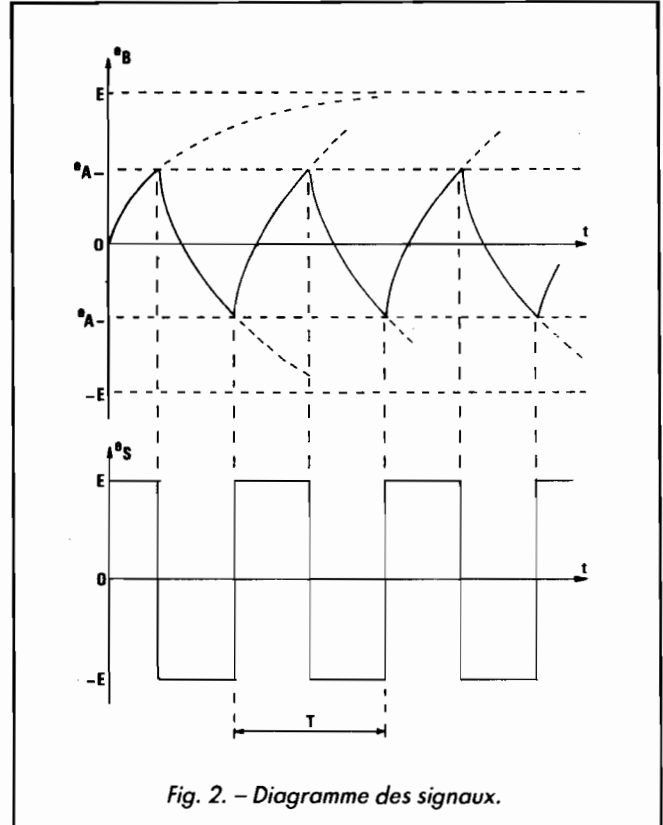


Fig. 2. - Diagramme des signaux.

On peut transformer le circuit de la figure 1 pour le faire fonctionner sur une source unique : la figure 3 montre les modifications à effectuer. Grâce aux résistances R_4 et R_5 , de valeurs égales, et faibles vis-à-vis de R_1 , R_2 et R_3

(50 fois moins environ), le point M constitue une masse virtuelle, au potentiel $E/2$. La tension en dents de scie e_S reste toujours positive, et les crêteaux de la sortie e_S évoluent entre 0 et $+E$, aux décalés près. Remarquons qu'il

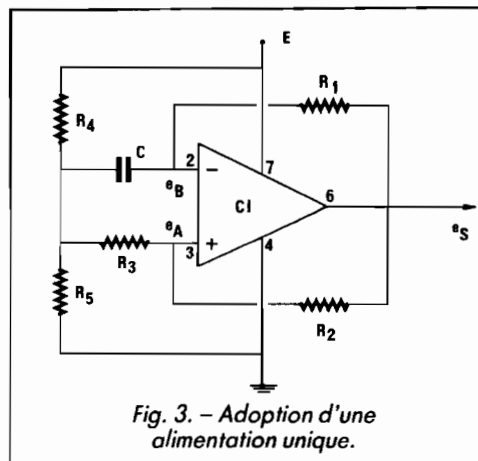


Fig. 3. - Adoption d'une alimentation unique.

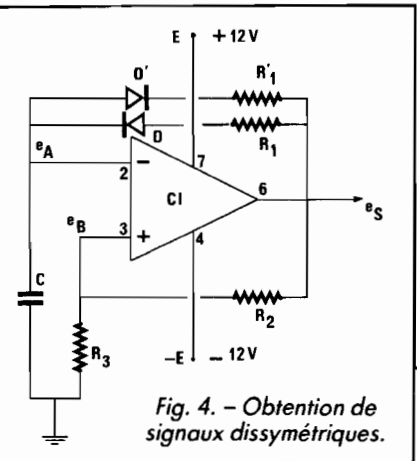
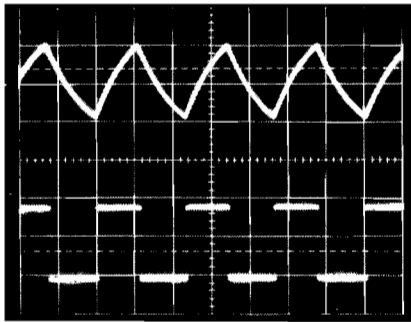
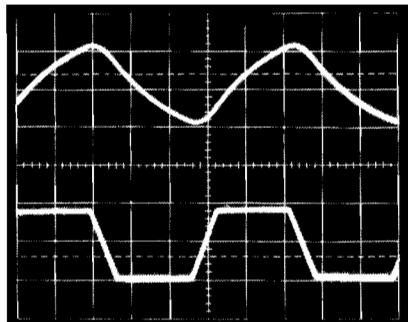


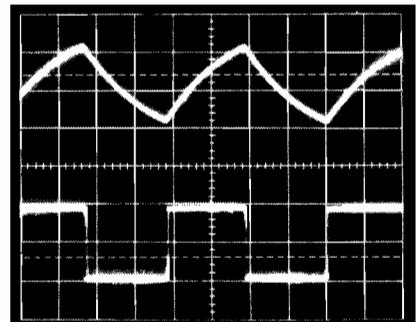
Fig. 4. - Obtention de signaux dissymétriques.



Oscillogramme A. - Balayage : 5 ms/division. En haut : 5 V/division. En bas : 10 V/division.



Oscillogramme B. - Balayage : 50 μ s/division. En haut : 5 V/division. En bas : 10 V/division.



Oscillogramme C. - Balayage : 50 μ s/division. En haut : 5 V/division. En bas : 10 V/division.

devient alors possible d'employer, pour C, un condensateur électrolytique, donc de forte capacité, ce qui résout le problème des très basses fréquences.

AUGMENTONS LA FREQUENCE

Les relations qui donnent la période T, et la fréquence F, montrent qu'il suffit de diminuer R₁, ou C, ou les deux. Avec le montage de la figure 1, et toujours l'amplificateur LM741, expérimentons cette solution. Nous prendrons maintenant :

$$\begin{aligned} R_1 &= 100 \text{ k}\Omega \\ R_2 = R_3 &= 270 \text{ k}\Omega \\ C &= 1 \text{ nF} \end{aligned}$$

ce qui doit conduire à une fréquence d'environ 5 kHz.

L'oscillogramme B (vitesse de balayage de 50 μ s/division) montre les résultats obtenus. On note essentiellement deux phénomènes :

- d'abord, les transitions des créneaux (montées et descentes) occupent une durée importante vis-à-vis de la période, qu'on peut évaluer à 30 μ s environ ;

- corrélativement, les inversions de pente des dents de scie s'effectuent difficilement, et les sommets s'arrondissent. Ces difficultés, qui limitent la fréquence maximale d'oscillation (les 4 kHz obtenus dans notre exemple constituent un

grand maximum !), proviennent du slew-rate de l'amplificateur opérationnel, c'est-à-dire de sa vitesse maximale de montée et de descente en sortie. On l'exprime traditionnellement en volts/microseconde (V/ μ s). L'oscillogramme B nous permet de déterminer le slew-rate du LM741 : il faut 30 μ s pour une excursion de 20 V, ce qui donne :

$$SR = \frac{20}{30} = 0,66 \text{ V}/\mu\text{s}$$

CHANGEONS D'AMPLIFICATEUR OPERATIONNEL

Puisque le faible slew-rate du LM741 limite à quelques kHz la fréquence maximale d'oscillation, nous ne pourrions aller au-delà qu'en choisissant un amplificateur aux performances meilleures. Essayons le LF356, pour lequel le constructeur annonce un slew-rate de 12 V/ μ s (voir tableau en fin d'article).

L'oscillogramme C, relevé avec les mêmes valeurs que dans l'expérience précédente pour R₁, R₂, R₃ et C, et avec la même vitesse de balayage de 50 μ s/division montre l'amélioration sensible des résultats, pour une fréquence de 5 kHz (et non plus 4 : on gagne 50 μ s par période, sur les durées des transitions).

Ceci nous encourage à essayer mieux, et à vérifier le slew-rate du LF356. Nous réaliserons donc le même montage (fig. 1), mais avec, cette fois :

$$\begin{aligned} R_1 &= 100 \text{ k}\Omega \\ R_2 = R_3 &= 270 \text{ k}\Omega \\ C &= 120 \text{ pF} \end{aligned}$$

L'oscillogramme D, balayé à 10 μ s/division, montre des résultats encore très acceptables, à une fréquence de 25 kHz environ.

Poussé dans ses derniers retranchements (mêmes valeurs que précédemment, sauf C = 27 pF), le LF356 fait apparaître les méfaits de son slew-rate. L'oscillogramme E (balayage à 2 μ s/division) montre des durées d'environ 1,5 μ s pour une excursion voisine de 20 V, d'où :

$$SR = \frac{20}{1,5} = 13 \text{ V}/\mu\text{s}$$

On pourrait aller plus loin encore (oscillations propres à plus de 100 kHz) avec le LF357, qui offre un slew-rate de 50 V/ μ s.

ELABORONS DES TRIANGLES...

Les triangles, dents de scie symétriques à montées et descentes linéaires, et non plus exponentielles, font partie des signaux les plus utiles pour tester des amplificateurs, et notamment vérifier leurs amplitudes d'écrêtage. Bien

que le circuit de la figure 1 ne constitue pas l'idéal pour l'élaboration de tels signaux, nous allons voir qu'il s'y prête tout de même.

Si on limite l'excursion des rampes e_B de la figure 1, et des oscillogrammes correspondants, à des valeurs très inférieures à + E et - E, les fragments d'exponentielles deviennent assimilables à des segments de droite. Il suffit, pour cela, de modifier les valeurs relatives de R₂ et de R₃. Avec un amplificateur LF356, expérimentons le schéma de la figure 1, en donnant aux composants les nouvelles valeurs :

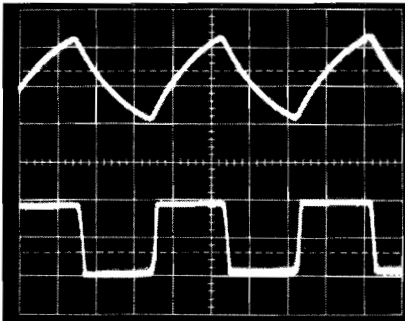
$$\begin{aligned} R_1 &= 100 \text{ k}\Omega \\ R_2 &= 270 \text{ k}\Omega \\ R_3 &= 10 \text{ k}\Omega \\ C &= 1 \text{ nF} \end{aligned}$$

Les potentiels e_{A+} et e_{A-} deviennent :

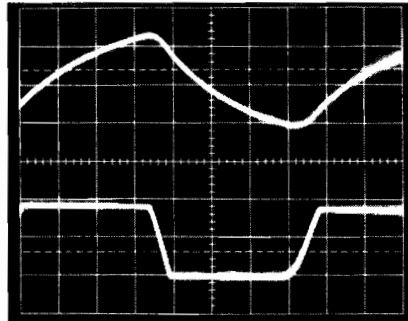
$$e_{A+} = |e_{A-}| = \frac{R_3}{R_2 + R_3} E = 0,43 \text{ V}$$

soit une amplitude crête à crête de 0,86 V, pour les rampes.

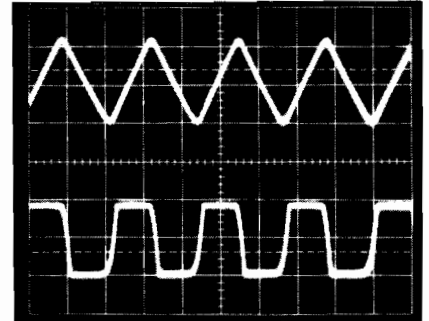
L'oscillogramme F montre les résultats obtenus. La période T descend à 20 μ s environ (F = 50 kHz), ce que la relation établie plus haut laissait prévoir. Dans ces conditions, les durées de transition des créneaux apparaissent gênantes, et les dents de scie tardent à s'inverser, ce qui explique leur amplitude (environ 1,2 V crête à crête). Pour retrouver des créneaux propres, et les am-



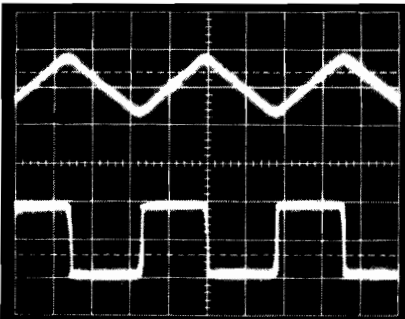
Oscillogramme D. - Balayage : $10 \mu\text{s}/\text{division}$. En haut : $5 \text{ V}/\text{division}$. En bas : $10 \text{ V}/\text{division}$.



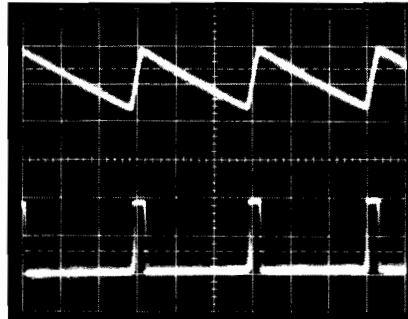
Oscillogramme E. - Balayage : $2 \mu\text{s}/\text{division}$. En haut : $5 \text{ V}/\text{division}$. En bas : $10 \text{ V}/\text{division}$.



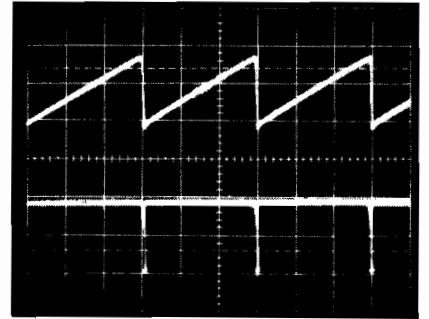
Oscillogramme F. - Balayage : $10 \mu\text{s}/\text{division}$. En haut : $500 \text{ mV}/\text{division}$. En bas : $10 \text{ V}/\text{division}$.



Oscillogramme G. - Balayage : $50 \mu\text{s}/\text{division}$. En haut : $500 \text{ mV}/\text{division}$. En bas : $10 \text{ V}/\text{division}$.



Oscillogramme H. - Balayage : $100 \mu\text{s}/\text{division}$. En haut : $500 \text{ mV}/\text{division}$. En bas : $10 \text{ V}/\text{division}$.



Oscillogramme I. - Balayage : $100 \mu\text{s}/\text{division}$. En haut : $500 \text{ mV}/\text{division}$. En bas : $10 \text{ V}/\text{division}$.

plitudes calculées, il faut diminuer la fréquence. Pour l'oscillogramme G, nous avons pris $C = 10 \text{ nF}$.

... PUIS DES IMPULSIONS

M. de La Palice l'aurait trouvé : les impulsions ne sont que des créneaux plus ou moins dissymétriques. Si on se rapporte à l'analyse du fonctionnement du multivibrateur, cela implique des durées inégales pour la charge et la décharge du condensateur C. Il faut donc que la résistance R_1 prenne une valeur à la charge, et une autre à la décharge. Comment y parvenir ? La figure 4 fournit la solution. Lorsque $e_5 = +E$, seule la diode D_1 conduit, et C se charge à travers R_1 . Si $e_5 = -E$, seule D_2 conduit, et C se décharge à travers R'_1 . L'os-

cillogramme H montre les résultats obtenus pour :

$R_1 = 27 \text{ k}\Omega$
 $R'_1 = 270 \text{ k}\Omega$
 $R_2 = 270 \text{ k}\Omega$
 $R_3 = 10 \text{ k}\Omega$
 $C = 10 \text{ nF}$

On obtient des impulsions positives d'environ $30 \mu\text{s}$, avec une période de $300 \mu\text{s}$. Enfin, pour l'oscillogramme I,

on a pris $R_1 = 270 \text{ k}\Omega$, et $R'_1 = 2,7 \text{ k}\Omega$.

La sortie e_5 produit de très fines impulsions négatives.

CONCLUSION

Le multivibrateur astable assez « rustique » pris comme point de départ est susceptible d'améliorations nombreu-

ses, au prix de quelques modifications simples : changement d'amplificateur opérationnel, autres valeurs des composants... Nous espérons que le lecteur trouvera quelque plaisir à expérimenter ces circuits, et à les employer dans des montages de son propre cru.

R. RATEAU

	LM741	LF356	LF357
Tension maximale d'alimentation	$\pm 22 \text{ V}$	$\pm 18 \text{ V}$	$\pm 18 \text{ V}$
Courant de polarisation	$0,5 \mu\text{A}$	200 pA	200 pA
Gain différentiel	25 000	25 000	25 000
Slew-rate	$0,5 \text{ V}/\mu\text{s}$	$12 \text{ V}/\mu\text{s}$	$50 \text{ V}/\mu\text{s}$
Courant maximal de sortie	25 mA	10 mA	10 mA

Tableau. - Caractéristiques principales de quelques amplificateurs opérationnels.