Multivibrateur à inverseurs logiques
Une autre manière de présenter cette leçon

par R. MOREAU
33000 Bordeaux

1. EXPOSÉ DES MOTIFS

Cette leçon fait, en quelque sorte, partie des traditions de l'enseignement en section F_2 des lycées techniques où le professeur de physique appliquée doit présenter à ses élèves quelques exemples d'horloges fournissant un signal périodique stable dans le temps.

Elle y est souvent choisie par les professeurs stagiaires comme leçon de CAPES. On la présente généralement selon la séquence suivante :

a) On donne le montage aux élèves et on le commente.

b) On observe d'emblée à l'oscilloscope les signaux fournis par celui-ci.

c) On les justifie a posteriori en considérant l'évolution du système soit après un instant particulier du régime permanent tel que l'oscilloscope le décrit, soit en se donnant des conditions initiales simples conduisant de toute manière au régime permanent après un régime transitoire très court.

Cette pédagogie convient aux élèves de la section F_2 qui utilisent des horloges dans leurs montages d'atelier et qui sont habitués à appréhender «de l'extérieur» les systèmes qu'ils ont à mettre en œuvre, en analysant les signaux qu'ils émettent, ou en observant la manière dont ils réagissent aux signaux d'entrée. Elle ne convient pas forcément aux élèves des sections C, D et E (ni à leurs professeurs), pour lesquels l'enseignement de cette question n'a pas les mêmes finalités.

Pour les élèves de l'enseignement général cette leçon doit, avant tout, permettre d'observer grâce à l'oscilloscope, et de pratiquer des mesures qualitatives (de période, de niveaux, etc...) ; elle doit aussi montrer qu'un simple circuit RC, associé à deux inverseurs logiques aisément modélisables, permet de déboucher sur des réalisations pratiques présentant de l'intérêt.

Ces élèves donc, ainsi que leurs maîtres, peuvent préférer une démarche où le fonctionnement du multivibrateur est présenté comme l'aboutissement d'un raisonnement (incluant l'expérience), plutôt qu'imposé a priori.

Nous proposons donc ci-dessous (après discussion avec un animateur, M. DUBOS, que je remercie), un processus pédagogique qui va du simple au compliqué, du connu à l'inconnu, et qui met d'abord l'accent sur le comportement d'un circuit RC.

Il suppose bien entendu quelques prérequis qui sont mentionnés rapidement car ils font l'objet d'un large consensus.

2. PRÉREQUIS

2.1. Circuit RC

Lorsqu'un système RC (figure 1), est soumis à une d.d.p. constante U, la charge q du condensateur évolue selon une loi de la forme :

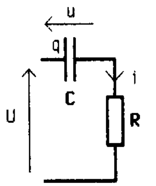

Figure 1

$$q = q_1 + q_2 . e^{-\frac{t}{RC}}$$

Il en est de même de la tension $u = q/C$:

$$u = u_1 + u_2 e^{-\frac{t}{RC}}$$

Quant à l'intensité i(t), elle suit la loi :

$$i = I_0 e^{-\frac{t}{RC}}$$

Toutes ces grandeurs cessent d'évoluer au bout d'une durée qui est de l'ordre de 4 ou 5 RC. Pour $t >> RC$, on a donc :

$$q(\infty) = C\,U \qquad u(\infty) = U \qquad i(\infty) = 0$$

2.2. Inverseurs logiques

On sait modéliser un inverseur logique. Sa tension de sortie, notamment, est égale à E, tension d'alimentation, ou à 0, tant que les courants mis en jeu sont de l'ordre du milliampère. Cette tension bascule d'un état à l'autre lorsque la tension d'entrée franchit un seuil de $\frac{E}{2}$.

Son courant d'entrée est négligeable.

3. ÉTUDE D'UN SYSTÈME RC

On dispose d'un générateur fournissant un signal e(t) périodique, composé de créneaux de hauteur E (en pratique la tension e(t) est fournie par un multivibrateur semblable à celui dont on cherche à expliquer le fonctionnement mais dont la fréquence est réglable grâce à un potentiomètre). Dans un premier temps, la période T de e(t) est très supérieure à la constante de temps RC du système que l'on étudie.

On applique ce signal à l'entrée d'un inverseur logique, selon le montage de la figure 2. On a donc $v_{e1}(t) = e(t)$.

On en déduit la courbe représentant $v_{s1}(t)$, que l'on observe à l'oscilloscope.

3.1. La résistance R esr reliée à la masse

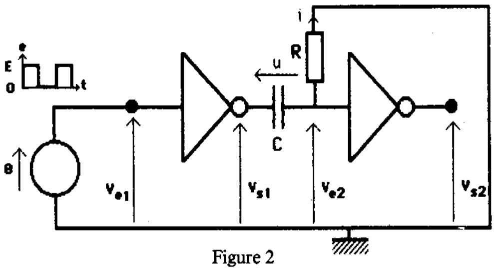

Figure 2

On peut chercher l'allure de la courbe représentant $v_{e2}(t)$; on est guidé pour cela par deux remarques :

– à la fin de chaque demi-période T/2 (pour $t = nT/2 - \epsilon$), on a $v_{e2} = 0$. En effet on a $v_{e2} = Ri$ et $i\ (nT/2 - \epsilon) = 0$ puisque les basculements sont imposés par $v_{e1}(t)$ au début de chaque demi-période et que $T >> RC$.
Donc $v_{e2}(nT/2 - \epsilon) = 0$.

– L'intensité i est finie (en effet dans l'équation $v_{s1} = u + Ri$, les termes u et v_{s1} sont finis, donc, par différence, le terme Ri est fini), par conséquent la dérivée $dq/dt = i$ est finie et la charge du condensateur

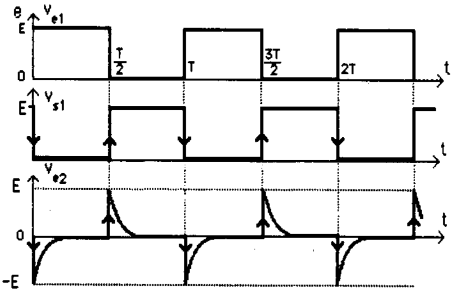

Figure 3

ne peut varier brusquement. On en déduit que la fonction $u(t) = q/C$ n'admet pas de discontinuité. De ce fait, puisque $u = v_{s1} - v_{e2}$, les brusques variations (d'amplitude $\pm$ E) de la tension $v_{s1}(t)$ se retrouvent exactement dans celles de la tension $v_{e2}(t)$: on dit que le condensateur transmet les variations brusques. Compte tenu de ces deux remarques, il est facile de représenter $v_{e2}(t)$ (figure 3). Le fait de souligner, par des flèches, la concomitance des variations brusques de $v_{s1}(t)$ et $v_{e2}(t)$, facilite beaucoupe le dessin.

3.2. **R est reliée à la borne positive de l'alimentation** (figure 4)

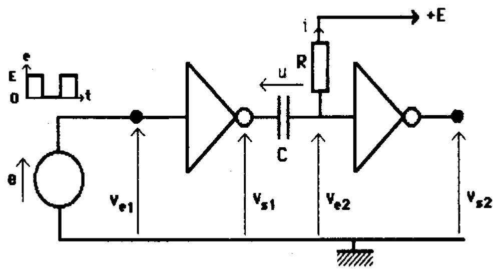

Figure 4

Les mêmes considérations : (a) on connaît la valeur de v_{e2} aux instants $nT/2$, ici $+E$; (b) on connaît la position et l'amplitude des discontinuités de v_{e2}, égales à celles de v_{s1}, permettent de représenter v_{e2} (figure 5). Les personnes auxquelles on a expliqué la-manière de déterminer l'allure de $v_{e2}(t)$ dans le premier cas, effectuent facilement le même travail dans ce second cas très voisin. On vérifie à l'oscilloscope.

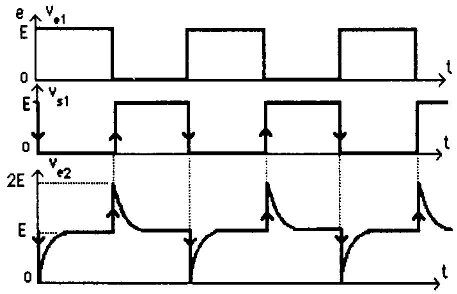

Figure 5

On constate que la forme de la tension v_{e2} est la même que précédemment, à une translation d'amplitude E près : la courbe représentant $v_{e2}(t)$ oscille autour de E au lieu de varier autour de la valeur nulle lorsque R est reliée à la masse.

3.3. R est reliée au générateur fournissant la tension d'entrée e(t) : (figure 6)

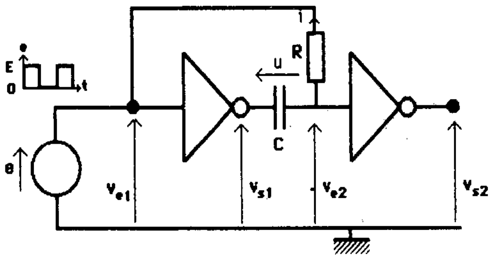

Figure 6

On utilise toujours les mêmes «recettes» pour construire la courbe représentant v_{e2} (t)(figure 7). Ensuite, on vérifie que l'oscilloscope confirme les prévisions.

Aux instants tels que $t = (2n+1)\ T/2 + \epsilon$, la tension v_{e2} part de la valeur E qui est celle de v_{e1} pour $t = (2n+1)\ T/2 - \epsilon$. Elle subit alors la même discontinuité que v_{s1}, c'est-à-dire qu'elle passe de E à 2E.

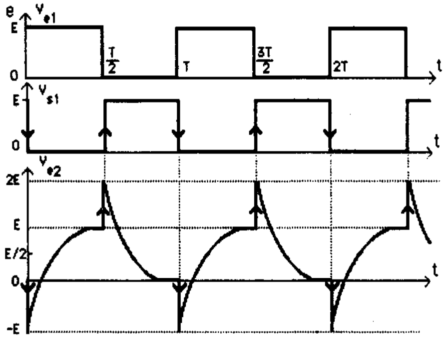

Figure 7

Aux instants tels que t = $nT+\epsilon$, v_{e2} part de la valeur nulle qui est celle de v_{e1} pour t = $nT-\epsilon$. Elle subit alors une brusque variation ayant la même amplitude que celle de v_{s1} et passe donc de 0 à $-E$.

On remarque que la valeur moyenne de v_{e2} est E/2.

Sans rien modifier au montage précédent, augmentons maintenant la fréquence f du signal d'entrée e(t) = $v_{e1}(t)$. La valeur moyenne de $v_{e2}(t)$ reste la même, ainsi que les amplitudes de ses discontinuités, mais les valeurs extrémales varient car ces discontinuités surviennent avant que les régimes transitoires soient achevés.

On obtient par exemple les courbes de la figure 8.

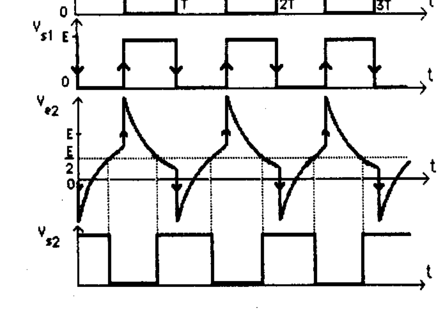

Figure 8

Au dessous de la courbe représentant $v_{e2}(t)$, on a tracé également le graphe de la tension de sortie $v_{s2}(t)$ du deuxième inverseur logique.

On peut en effet prévoir la forme de v_{s2} à partir de celle de v_{e2} en appliquant simplement la règle selon laquelle :

$$v_{e2} < E/2 \Longleftrightarrow v_{e2} = E \qquad \text{et} \qquad v_{e2} > E/2 \Longleftrightarrow v_{s2} = 0$$

On constate que dans le cas de la figure 8, les basculements de v_{s2}, dûs au franchissement du seuil E/2 par la tension v_{e2} sous l'action du système RC, précèdent ceux de $v_{e1}(t)$.

Augmentons encore la fréquence et notons f_0 la valeur de f pour laquelle les discontinuités qui sont imposées à v_{e2} surviennent aux instants où $v_{e2} = E/2$. Pour $f = f_0$, nous otenons les courbes de la figure 9 où l'on constate que les tensions v_{e1} et v_{s2} sont indentiques.

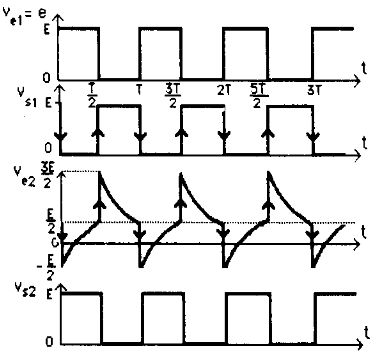

Figure 9

Pour $f = f_0$, du fait que $v_e(nT/2 - \epsilon) = E/2$, les basculements de v_{s2} sont encore entièrement dûs à l'évolution du système RC.

Augmentons encore f et observons les différentes tensions d'entrée et de sortie de deux inverseurs (figure 10).

On remarque que les tension $v_{s2}(t)$ et $v_{e1}(t)$ restent indentiques. Mais les basculements de v_{s2} sont dûs maintenant essentiellement à la transmission des fronts de montée ou de descente de v_{s1} par le condensateur. En effet, aux instants $t = nT/2 + \epsilon$, la tension v_{e2} n'a pas encore atteint la valeur E/2.

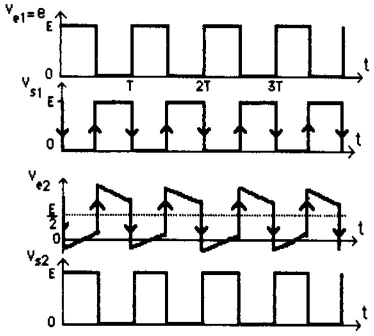

Figure 10

4. MULTIVIBRATEUR ASTABLE

4.1. Montage et observations

Dans le montage précédent (figure 6), ce qui distingue la fréquence f_0 des autres, c'est que pour $f = f_0$, les basculements du deuxième inverseur logique sont dûs à l'évolution du système RC (comme pour $f < f_0$) et que la tension d'entrée v_{e1} du système est identique à sa tension de sortie v_{s2} (comme pour $f > f_0$). Imposons cette deuxième condition en reliant la sortie du deuxième inverseur à l'entrée du premier (nous obtenons un système bouclé, alors que le précédent était ouvert) et ôtons le générateur fournissant e(t). Nous réalisons ainsi le montage de la figure 11.

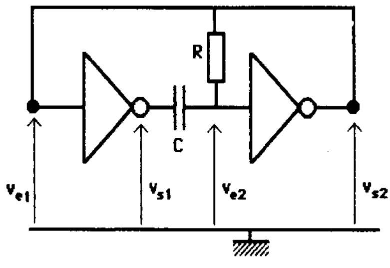

Figure 11

Observons les différentes tensions v_{e1}, v_{s1}, v_{e2} et v_{s2} (figure 12).

On obtient exactement les mêmes courbes que celles qui sont dessinées sur la figure 9 : on a réalisé un montage qui oscille de manière autonome et qui fournit donc un signal périodique dont la fréquenxe $f = f_0$ est réglée par le produit RC.

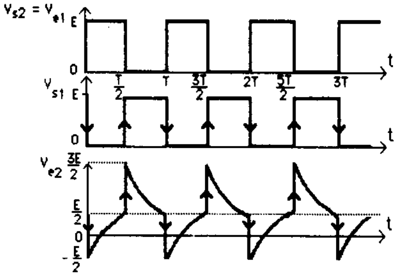

Figure 12

4.2. Interprétation

Comme dans le cas du montage ouvert de la figure 6, la tension v_{e1}, imposée par v_{s2} est égale à 0 ou E. Elle impose les basculements de v_{s1}. Le système RC provoque alors l'évolution de v_{e2} selon les mêmes processus que dans le montage ouvert, ce qui entraîne les basculements de v_{s2} etc...

5. COMPLÉMENT : POURQUOI LES OSCILLATIONS COMMENCENT-ELLES ?

Avec ce montage, s'il y a un premier basculement, d'autres suivent et le fonctionnement est alors permanent. En effet, en dehors des instants de transitions (t_i = nT/2 sur tous nos schémas temporels), les états de sortie des deux inverseurs sont nécessairement complémentaires, puisque la sortie du deuxième constitue l'entrée du premier. Les sorties étant complémentaires, le système RC, auquel est imposée une tension U égale à ± E, différente de la tension u qui existe aux bornes du condensateur (figure 1), évolue nécesssairement. Son évolution même conduit à un prochain basculement etc...

La question revient donc à se demander pourquoi il y a un premier basculement, ou plutôt pourquoi le système ne peut rester dans l'état ϕ défini par $v_{e1} \approx v_{s1} \approx v_{e2} \approx v_{s2} \approx E/2$.

Supposons qu'à partir de ϕ, v_{e1} augmente très légèrement, v_{s1} alors diminue très fortement (figure 13) et de ce fait cette diminution est rapide. Le condensateur transmet cette diminution et, nécessairement, v_{e2} passe au dessous du seuil de basculement du deuxième inverseur, si bien que v_{s2} augmente et cette augmentation renforce l'augmentation initiale de v_{e1}.

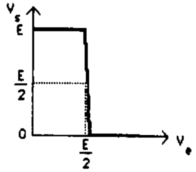

Figure 13

La figure 14 symbolise ces différentes variations à partir de ϕ :

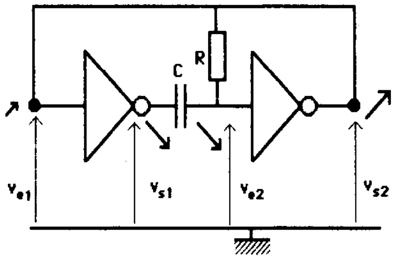

Figure 14

En supposant qu'à partir de ϕ, la tension v_{e1} diminue, nous verrions de la même manière que le système réagit de manière à amplifier cette variation initiale : ϕ est donc un état instable puisqu'une petite pertubation initiale est autoamplifiée par le système. Celui-ci, par conséquent, ne peut rester dans l'état ϕ. Il prend donc une configuration où les sorties sont complémentaires (v_{s1} = E, v_{s2} = 0 ou v_{s1} = 0, v_{s2} = E), et l'évolution du dipôle RC le fait ensuite changer périodiquement de configuration etc...