

A partir d'un montage simple en Électronique

par Marcel MANCINI

Lycée I. Dauphin, 84300 Cavaillon

Disposant d'une diode au silicium et d'un conducteur ohmique placés en série et alimentés par un générateur BF, nous allons, dans un premier temps, fabriquer des signaux en forme de «tente de camping familiale». Ensuite, nous entreprendrons une recherche, tant sur les plans expérimental que théorique, afin de sauvegarder la structure des signaux observés sur l'écran de l'oscillographe lorsqu'on introduira dans le montage une inductance en vue de la vérification expérimentale de la loi de LENZ-FARADAY.

1. OBTENTION DES SIGNAUX

Le circuit suivant sera désormais appelé le circuit de base (figure 1).

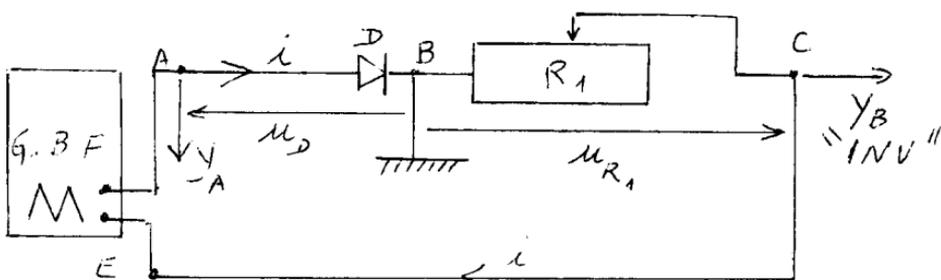


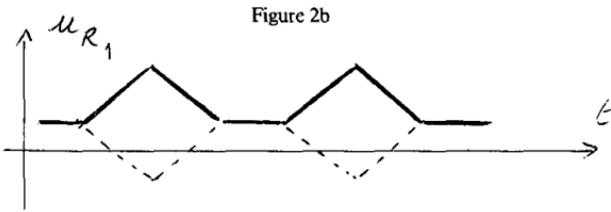
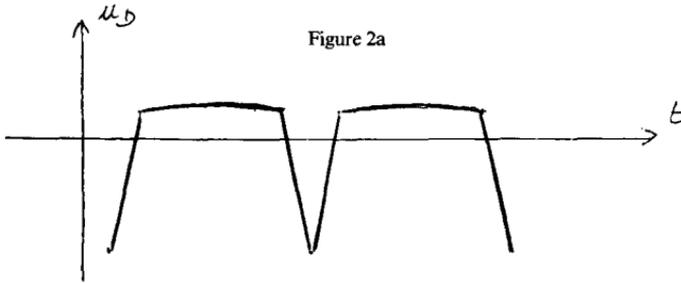
Figure 1

D est une diode au silicium, tension de seuil $u_s = 0,8 \text{ V}$.

Le rhéostat a une résistance de valeur 100Ω .

Le G.B.F. utilisé ici a une impédance de sortie de 50Ω .

Enfin, on dispose du même gain sur les deux voies y_A et y_B . On obtient alors les oscillogrammes suivants : (figures 2a et 2b).



En pointillés, oscillogramme obtenu avec y_B normal ($u_{R_1} = -R_1 i$) avec i non algébrisé.

Avec la voie «INVERSE B» et en amenant avec la commande de cadrage vertical les figures 2a et 2b sur leurs parties communes, on observe l'oscillogramme de la photo 1.

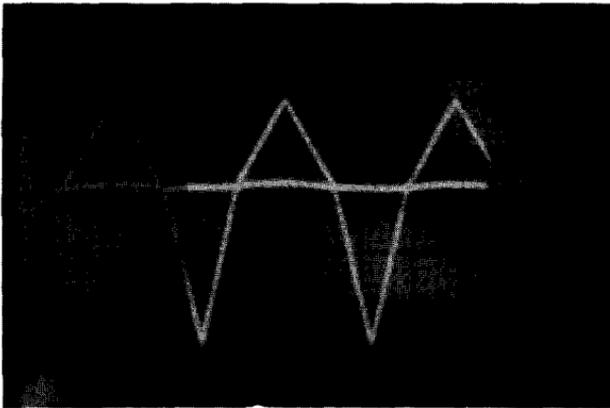


Photo 1

On débranche ensuite la connexion en y_B et la masse est placée en E. La tension somme $u_{AE} = u_{AB} + u_{BC}$ est ainsi visualisée (figure 3).

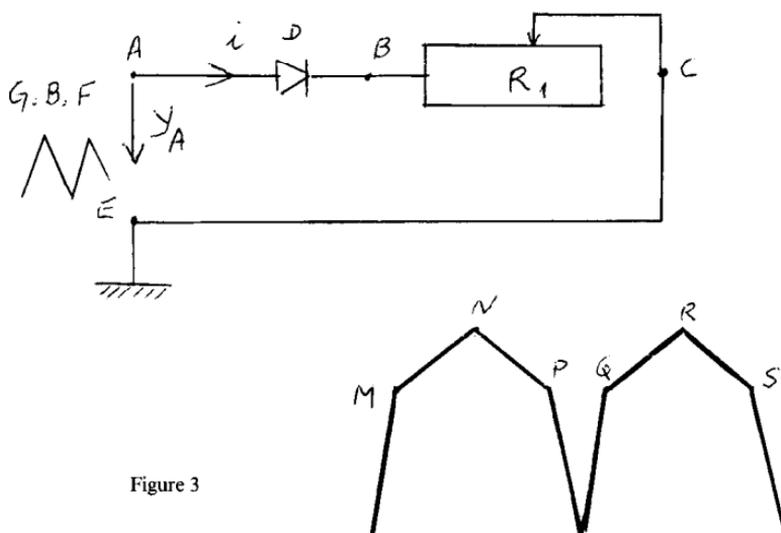


Figure 3

Le rhéostat permet de donner différentes inclinaisons aux segments MN, NQ, QR... Les parties légèrement curvilignes MP, QS... ont disparu.

Il est aisé d'interpréter le fait suivant lequel la tension somme u_{AE} peut devenir quasiment triangulaire quand la résistance du rhéostat augmente.

1.1. Remarque 1

On peut vérifier également la loi d'additivité des tensions, en régime variable, dans le cas de l'approximation des régimes quasi-permanents.

1.2. Remarque 2

On peut aussi remplacer dans le circuit de base la diode au silicium par une diode régulatrice de tension ou «diode ZENER»

Interpréter.

2. A LA RECHERCHE D'UN MONTAGE PERMETTANT LA VÉRIFICATION DE LA LOI DE LENZ-FARADAY

On a deviné l'intérêt des signaux en «tente de camping familiale» lorsque le circuit de base est fermé. Le problème consiste à les réinjecter -

sans distorsion - dans un circuit comprenant une bobine inductive de telle sorte que l'on puisse obtenir dans une bobine induite une f.é.m induite représentant sur quatre «étages» la dérivée $-\dot{\Phi}(t)$. Habituellement, on part le plus souvent de signaux triangulaires et symétriques.

Après avoir présenté le circuit de base et observé les divers oscillogrammes, dont l'interprétation fut faite sans difficulté, je demandais ensuite à l'auditoire comment on pouvait procéder pour arriver au but recherché. Ce fut alors la phase de tâtonnement expérimental.

Les élèves suggèrent d'abord de placer en série avec le circuit de base la bobine inductrice. Un conducteur ohmique de résistance 47Ω , en série avec les éléments du circuit, permet de visualiser $i = f(t)$.

L'oscillogramme obtenu ne répondait pas au critère exigé, ce qui était d'ailleurs prévisible. Ce montage ne faisait qu'introduire des difficultés supplémentaires, tant valait-il partir directement des signaux triangulaires délivrés par le G.B.F. sans utiliser le circuit de base.

Un élève émit alors l'idée suivante : «si ça ne marche pas en série, il faut essayer de monter en parallèle aux bornes du circuit de base, la bobine inductrice». (Avec en série avec elle la résistance de 47Ω).

Nouvelle déception. Les sommets de l'oscillogramme s'affaissaient et se déformaient, la structure qu'on voulait conserver s'obstinait à ne plus apparaître. (Voir en appendice la justification dans le cas général).

C'est à partir de ce moment que la phase de réflexion commença véritablement - avec un réinvestissement des connaissances acquises dans les classes antérieures - je précise - connaissances simples donc fondamentales.

On calcula l'ordre de grandeur du coefficient d'inductance L de la bobine inductrice, formée de fil de cuivre verni à raison de 2 000 spires par mètre sur une longueur de 30 cm, fil bobiné sur un cylindre de 5 cm de diamètre. On trouva $L \approx 3.10^{-2}H$.

L'hypothèse suivante fut alors testée : pour des valeurs convenables de la résistance du circuit inducteur, ce dernier, compte tenu de la faible valeur de L , ne pouvait-il point être assimilé à un conducteur ohmique ? (La fréquence délivrée par le G.B.F. valant une centaine de Hz).

L'expérience vérifia pleinement ce point de vue. (figure 4).

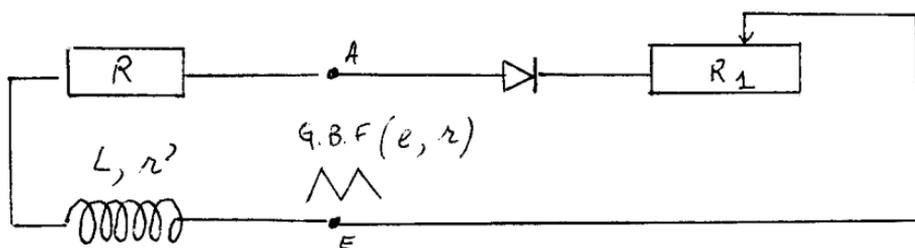


Figure 4

Pour $R = 100 \Omega$, les signaux aux bornes de cette résistance étaient nettement déformés. En augmentant progressivement cette valeur, à partir de $R = 500 \Omega$, on retrouvait la structure des signaux recherchés.

De façon qualitative, lorsque R croît, l'intensité du courant traversant la bobine diminue ainsi que la f.é.m induite. Le terme $L \frac{di}{dt}$ peut alors, pour une valeur convenable de R devenir négligeable par rapport à la tension aux bornes de R . A ce moment là, la branche du circuit en question peut être assimilée à un conducteur ohmique et aussi bien aux bornes du G.B.F qu'entre les bornes du conducteur ohmique de résistance R , apparaissent les signaux qu'on voulait sauvegarder.

Le circuit de base étant bien sûr toujours le même, on procède au montage suivant avec la bobine en question - ainsi qu'une bobine induite - en l'absence de tout noyau de fer. (figure 5).

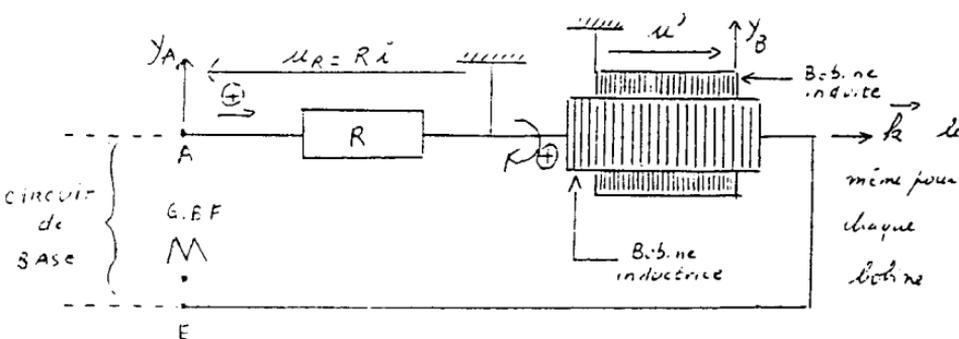


Figure 5

Il est bon de choisir des enroulements identiques, c'est-à-dire dans le même sens, pour les deux bobines. Les oscillogrammes observés sont

alors : (voir photo 2 : partie supérieure u_R et en dessous u').

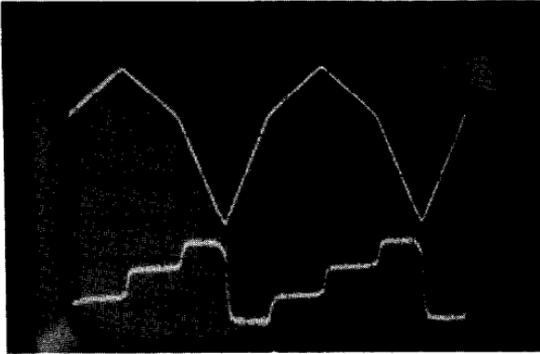


Photo 2

En tenant compte des conventions de signes utilisées, il est aisé d'interpréter partie par partie l'oscillogramme donnant la tension $u' = e$ entre les bornes de l'induit.

Il est aussi intéressant de procéder à quelques mesures. On est seulement limité par le gain 50 mV/cm de la voie B, ce qui explique que la bobine induite comporte aussi un assez grand nombre de tours de fil fin. Si l'on dispose d'un oscillographe allant jusqu'à 0,2 mV/cm, quelques tours au niveau de l'induit sont suffisants.

L'inducteur ayant été décrit, la bobine induite comportait environ 2 000 spires sur une longueur de 25 cm. Diamètre du fil de cuivre verni : 0,12 mm.

La période de balayage utilisé était de 2 ms/cm.

Sur la photo 2 - et mieux encore sur l'écran de l'oscillographe, on relève les valeurs suivantes. (figure 6).

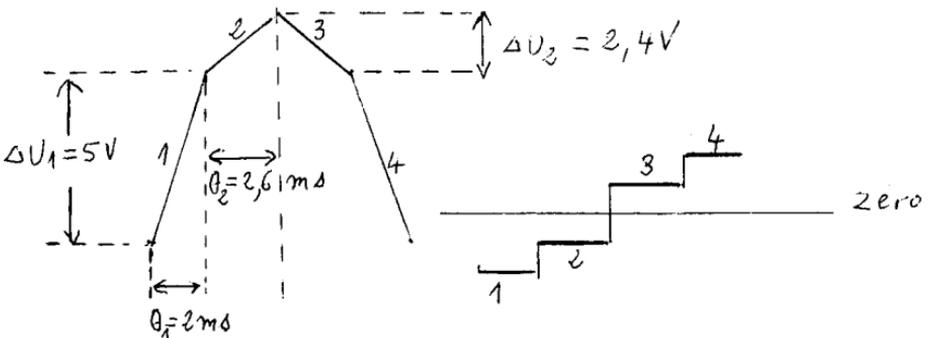


Figure 6

Évaluons $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ et comparons à la f.é.m induite :

• *Partie 1 de l'oscillogramme :*

$$\frac{\Delta\Phi}{\Phi t} = \frac{4 \pi \cdot 10^{-7} \times 2 \cdot 10^3 \times \frac{5}{500} \times 2 \cdot 10^3 \times \frac{25 \pi}{4} \cdot 10^{-4}}{2 \cdot 10^{-3}} = 0,049 \text{ V}$$

valeur conforme à ce qu'on peut mesurer sur l'oscillogramme en escalier.

• *Partie 2 de l'oscillogramme :*

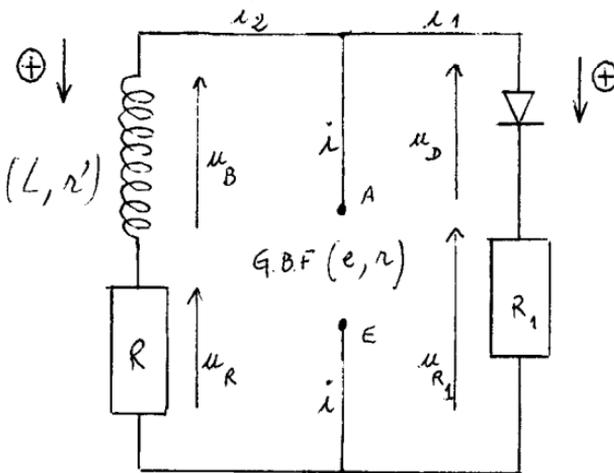
$$\frac{\Delta\Phi}{\Phi t} = \frac{4 \pi \cdot 10^{-7} \times 2 \cdot 10^3 \times \frac{2,4}{500} \times 2 \cdot 10^3 \times \frac{25 \pi}{4} \cdot 10^{-4}}{2,6 \cdot 10^{-3}} = 0,018 \text{ V}$$

valeur qui correspond également à ce qu'on mesure sur l'oscillogramme du bas. On a pris ici $R = 500 \Omega$.

Remarque : on peut utiliser les signaux obtenus dans le paragraphe 1. dans l'étude du montage dérivateur avec l'amplificateur opérationnel. Les oscillogrammes obtenus sont identiques à ceux représentés sur la photo 2.

En conclusion, je dirai qu'il est bon d'exploiter jusqu'au bout les phénomènes physiques simples et leurs conséquences. C'est ce que j'ai essayé de montrer à travers ce modeste travail, qui m'a passionné tout autant que l'auditoire, à telle enseigne qu'à la séance de cours suivante, trois élèves de terminale sont venus me demander le prix d'un oscillographe, car ils avaient l'intention de «monter» un petit laboratoire pour faire de la «recherche» comme on avait fait en classe !

Appendice



Nous appelons r' la résistance de la bobine inductrice, e la f.é.m du G.B.F, r sa résistance, i_1 l'intensité du courant qui traverse le circuit de base, i_2 l'intensité du courant qui traverse la branche contenant la bobine inductrice et i l'intensité du courant principal.

Nous allons procéder par parties en travaillant dans divers intervalles de temps au cours desquels la diode réelle utilisée sera bloquée ou passante.

1 - A partir de $t = 0$, soit θ_1 le temps au bout duquel la diode devient passante.

Alors pour $0 < t \leq \theta_1$ $i_1 = 0$

A chaque instant, on peut écrire :

$$u_{AE} = u_D + R_1 i_1 = r' i_2 + L \frac{di_2}{dt} + R i_2$$

Soit :

$$(1) \quad e - ri = kt - r(i_1 + i_2) = u_D + R_1 i_1 = r' i_2 + L \frac{di_2}{dt} + R i_2$$

Dans l'intervalle ci-dessus défini ($i_1 = 0$)

$$kt - ri_2 = u_D \quad \text{soit} \quad kt - ri_2 = r'i_2 + \frac{L di_2}{dt} + Ri_2$$

D'où :

$$\frac{L di_2}{dt} + (R + r' + r) i_2 = kt$$

La solution de cette équation différentielle linéaire avec second membre est :

$$i_2 = K e^{-\frac{A}{L}t} + \frac{k}{A}t - \frac{kL}{A^2} \quad \text{en posant} \quad A = R + r' + r$$

$$A t = 0 \quad i_2 = 0 \quad \text{soit} \quad 0 = K - \frac{kL}{A^2} \quad \text{d'où} \quad K = \frac{kL}{A^2}$$

Finalement :

$$i_2 = \frac{kL}{A^2} e\left(-\frac{A}{L}t - 1\right) + \frac{kt}{A}$$

Examinons deux cas :

- α $R = 50 \Omega$; $R_1 = 50 \Omega$; $r = 50 \Omega$ (résistance du G.B.F) ; $r' \neq 0$; $k = 2440 \text{ V/s}$ (voir photo 2 ou figure 6). Fixons t à $0,5 \cdot 10^{-3} \text{ s}$.

Le terme $\frac{kL}{A^2}$ vaut alors $7,32 \cdot 10^{-3}$, $\frac{kL}{A^2} e^{-\frac{A}{L}t} \neq 0,14 \cdot 10^{-2}$; $\frac{kt}{A} \neq 1,2 \cdot 10^{-2}$; $\frac{kt}{A} - \frac{kL}{A^2} \neq 0,47 \cdot 10^{-2}$. Le facteur exponentiel intervient, d'où la forme de l'oscillogramme observé.

- β Prenons maintenant $R = 500 \Omega$ en conservant les mêmes valeurs pour les autres paramètres :

$$\frac{kL}{A} \neq 2,4 \cdot 10^{-4} ; \frac{kL}{A^2} e^{-\frac{A}{L}t} \neq 2,5 \cdot 10^{-8} ; \frac{kt}{A} \neq 2,2 \cdot 10^{-3}$$

Le facteur exponentiel devient tout à fait négligeable vis à vis des autres termes. On retrouve alors l'aspect linéaire observé sur l'oscillographe.

2 - Soit maintenant θ_2 la durée pendant laquelle la diode est passante et que la f.é.m du G.B.F. est de la forme $e = k(t - \theta_1) + E_0$, E_0 étant la valeur de e quand $t = \theta_1$ soit $E_0 = k \theta_1$ avec $k > 0$ comme dans le cas précédent.

L'intervalle de temps dans lequel on travaille est tel que $\theta_1 < t \leq \theta_2$.

La tension u_D aux bornes de la diode ne dépend plus de t et vaut 0,8 V dans le cas envisagé.

L'équation (1) devient alors :

$$(2) \quad k(t - \theta_1) + E_0 - r(i_1 + i_2) = 0,8 + R_1 i_1 = r' i_2 + \frac{L}{dt} \frac{di_2}{dt} + R i_2$$

Par suite :

$$i_1(R_1 + r) = k(t - \theta_1) + E_0 - 0,8 - r i_2 \text{ d'où}$$

$$i = \frac{k(t - \theta_1) + E_0 - 0,8 - r i_2}{R_1 + r} \quad \text{et}$$

$$0,8 + R_1 \left[\frac{k(t - \theta_1) + E_0 - 0,8 - r i_2}{R_1 + r} \right] = r' i_2 + \frac{L}{dt} \frac{di_2}{dt} + R i_2$$

En ordonnant les différents termes, on trouve :

$$(3) \quad \frac{L}{dt} \frac{di_2}{dt} + i_2 \left(r' + R + \frac{R_1 \cdot r}{R_1 + r} \right) = \frac{R_1 \cdot k(t - \theta_1)}{R_1 + r} + \frac{E_0 \cdot R}{E_1 + r} + 0,8 \left(1 - \frac{R_1}{R_1 + r} \right)$$

Posons :

$$A = r' + R + \frac{R_1 \cdot r}{R_1 + r} ; \quad B = \frac{R_1 \cdot k}{R_1 + r} ; \quad C = \frac{E_0 \cdot R}{E_0 + r} + 0,8 \left(1 - \frac{R_1}{R_1 + r} \right)$$

L'équation différentielle (3) s'écrit :

$$\frac{L}{dt} \frac{di_2}{dt} + A i_2 = B(t - \theta_1) + C$$

La solution de cette équation est de la forme :

$$i_2 = K' e^{-\frac{A}{L}(t - \theta_1)} + \frac{B}{A}(t - \theta_1) + \frac{C}{A} - \frac{BL}{A^2}$$

A $t = 0$, $i_2 = 0$ ce qui donne :

$$0 = k' e^{-\frac{A}{L}\theta_1} - \frac{B}{A}\theta_1 + \frac{C}{A} - \frac{BL}{A^2}$$

$$\text{Par suite : } K' = \frac{\frac{B}{A}\theta_1 + \frac{BL}{A^2} - \frac{C}{A}}{e^{-\frac{A}{L}\theta_1}}$$

Conservons les mêmes valeurs numériques que celles utilisées dans le point 1 et prenons pour θ_1 la valeur $0,7 \cdot 10^{-3}$ s.

• α On trouve pour A la valeur 75Ω , pour B la valeur $1\,220$. Fixons t à $0,9 \cdot 10^{-3}$ s. Pour C, on trouve sensiblement $1,25$ et pour K' la valeur $2,1 \cdot 10^{-3}$.

Dans ces conditions, le terme contenant l'exponentielle prend pour valeur $0,0012$, celui qui suit $0,0032$ et les deux derniers $0,0166$ et $0,0065$.

La conclusion est la même que pour le cas 1. α .

• β A = 525Ω ; B = $1\,220$; C = $8,94$.

Cette fois, le terme exponentiel prend la valeur $6 \cdot 10^{-5}$ et les termes qui suivent valent respectivement $4,6 \cdot 10^{-4}$, $0,017$ et $1,3 \cdot 10^{-4}$.

La conclusion est la même que dans le cas 1. b.

• On peut poursuivre l'étude dans d'autres intervalles, y compris quand $u_D < 0$, les conclusions restent les-mêmes.