

Utilisation d'un montage assimilable à une diode sans seuil pour étudier la disparition du courant dans une bobine

par Denis GAUTHIER et Jean-Pierre DEFOSSEZ
Lycée Bernard Palissy - 47000 Agen

RÉSUMÉ

Un ordinateur muni d'une carte (ici CANDIPLUS) et d'un logiciel d'acquisition (ici PHYSCOPE) permet aujourd'hui d'enregistrer les régimes transitoires et de vérifier la validité des montages utilisés pour les étudier.

Nous montrons d'abord qu'un montage avec un interrupteur à point milieu, proposé il y a peu de temps encore en exercice dans les manuels, ne donne pas ce courant (§ 1). Avec le montage qu'on y trouve maintenant, utilisant une diode* pour court-circuiter la bobine, la courbe de décroissance est modifiée par la tension seuil (§ 2). Une association de cette diode avec un amplificateur opérationnel l'assimile à une diode sans seuil et supprime cette perturbation (§ 3).

1. UN MONTAGE THÉORIQUE INADAPTÉ

1.1. Schéma

On utilise une bobine à inductance réglable ($L = 0,85 H$; $r = 10 \Omega$), une résistance ($r' = 200 \Omega$) et une alimentation stabilisée ($E \cong 5,0 V$), figure 1.

1.2. Enregistrement

- On ferme d'abord l'interrupteur sur le générateur ; ensuite on l'ouvre et on le referme sur la résistance r' .

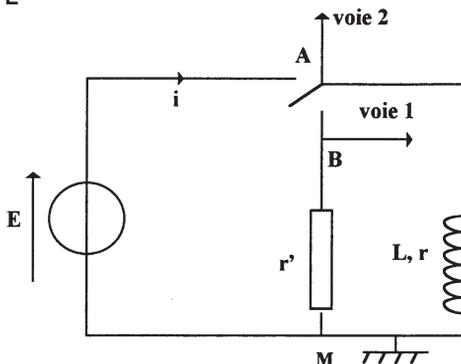


Figure 1

* Dites de «roue libre».

L'acquisition est faite sur 30 ms (1000 points, durée entre deux points 30 μ s) et synchronisée sur l'ouverture de l'interrupteur, voie 2 à 4,7 V décroissant. On obtient les courbes de la figure 2 avec pour la voie 1, $u_{BM}(t) = r' \cdot i(t) = 0$ sur toute l'acquisition : **aucun courant ne passe dans r'** .

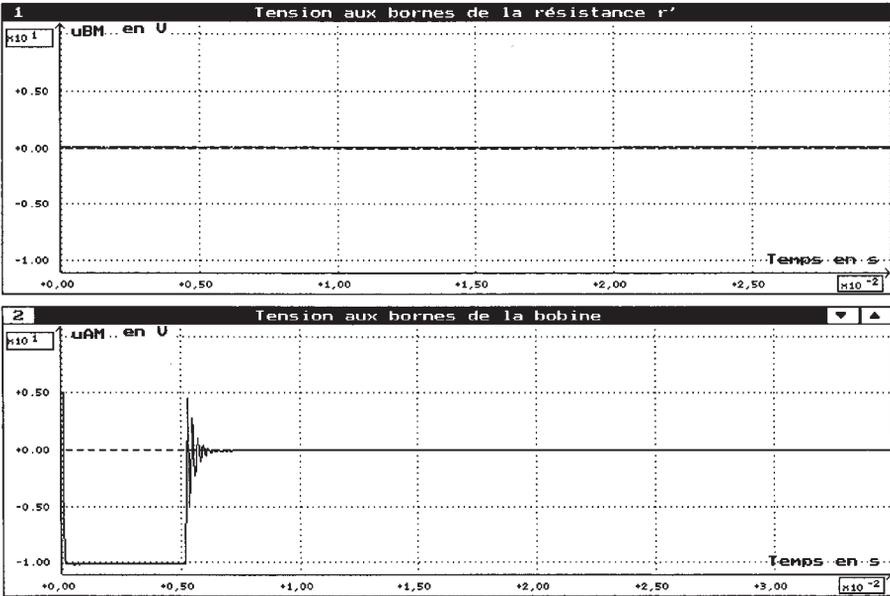


Figure 2

- En refaisant un enregistrement sans fermeture sur la résistance r' , on obtient la même courbe sur la voie 2 pour la tension aux bornes de la bobine, $u_{AM}(t)$.

Elle présente à l'ouverture, **pendant 5,35 ms**, une forte surtension négative $u_{AM} = -e = L \cdot di/dt$ correspondant bien à $di/dt < 0$, limitée sur l'enregistrement à -10 V par le dispositif de protection de la carte. Cette surtension provoque une étincelle de rupture aux bornes de l'interrupteur.

On note ensuite, **durant 1,17 ms**, des oscillations brèves et très amorties dont l'analyse donne une fréquence, $f = 5,70$ kHz, et une période, $T = 0,175$ ms. Ces oscillations montrent que cette bobine a une capacité propre C de l'ordre de $1 / L \cdot 4\pi^2 \cdot f^2 \cong 1$ nF.

On a enfin, **pour $t > 6,52$ ms**, $u_{AM} = 0$.

1.3. Conclusion

L'énergie électromagnétique de la bobine est ici dissipée en grande partie dans l'étincelle de rupture qui suit l'ouverture du circuit et ensuite dans ces oscillations accompagnées de l'émission d'ondes électromagnétiques.

La tension aux bornes de la bobine, u_{AM} , est nulle avant que l'on referme l'interrupteur sur la résistance r' . Ce montage ne permet pas de visualiser la disparition du courant dans une bobine.

2. MONTAGE AVEC UNE DIODE

2.1. Schéma

On reprend les mêmes composants avec une diode court-circuitant la bobine sur la résistance r' à l'ouverture du circuit et on enregistre en voie 1, $u_{BM}(t) = r' \cdot i(t)$, figure 3. On utilise d'abord une diode silicium $u_s = 0,60 V$, donnant la courbe $u_{BM1}(t)$; puis une diode de tension seuil plus faible, diode Schottky $u_s = 0,15 V$, donnant la courbe $u_{BM2}(t)$.

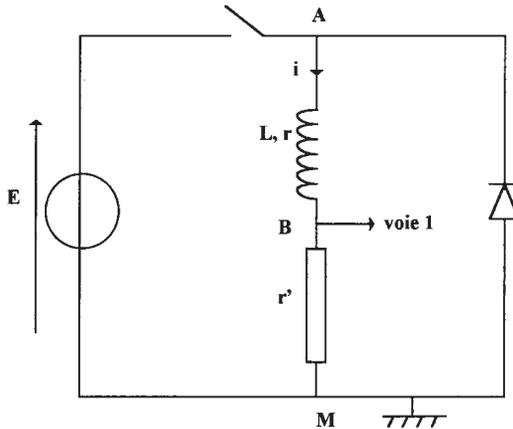


Figure 3

2.2. Enregistrement

Il est réalisé sur la même durée totale 30 ms et synchronisé sur la voie 1 à 4,7 V décroissant. On obtient pour $u_{BM}(t) = r' \cdot i(t)$, figure 4, une courbe ayant l'allure d'une exponentielle décroissante tronquée quand u_{BM} atteint zéro : le prolongement de la par-

tie $u_{BM} > 0$ aurait, dans le domaine $u_{BM} < 0$, une asymptote $u_{BM} = \text{constante}$. Cette déformation est atténuée mais subsiste cependant quand la tension seuil de la diode diminue.

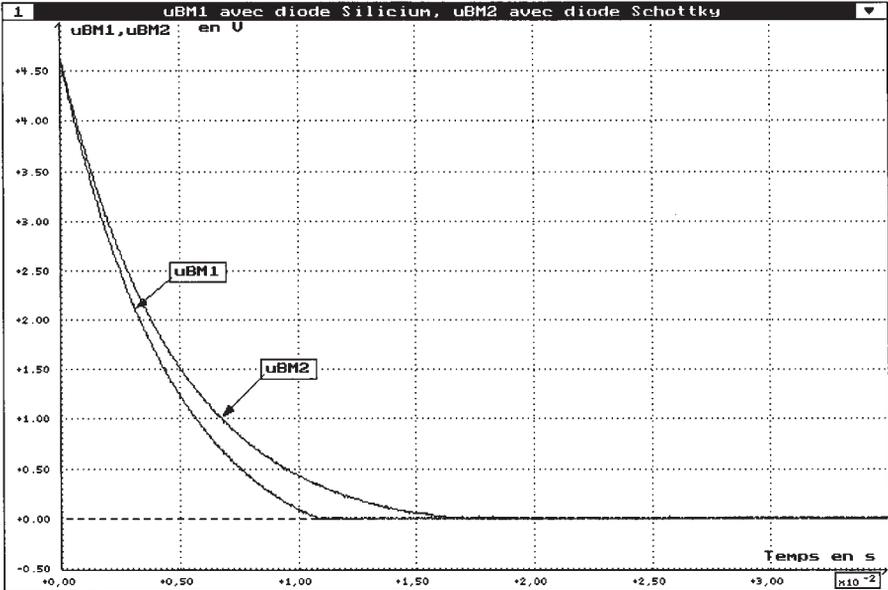


Figure 4

2.3. Modélisation

Le logiciel PHYSCOPE possède un traitement d'équation différentielle et permet de rapprocher une courbe expérimentale et une courbe de la modélisation.

Avec la feuille de calcul on fait tracer **les courbes expérimentales** :

$$i_1(t) = u_{BM1}(t) / r'$$

et

$$i_2(t) = u_{BM2}(t) / r'$$

Dans ce montage, pour $t \geq 0$:

$$u_{AB} + u_{BM} + u_s = 0$$

soit

$$L \cdot di / dt + r \cdot i + r' \cdot i + u_s = 0$$

et

$$L \cdot \frac{di}{dt} + R \cdot i = -u_s \quad (1)$$

avec

$$R = r + r'$$

Les courbes de la modélisation sont données par les solutions $i(t)$ de l'équation (1), tracées avec $L = 0,85 H$, $R = 210 \Omega$, et successivement, $u_s = 0,60 V$ puis $u_s = 0,15 V$. On prend pour valeur initiale I_0 du courant la valeur relevée au curseur sur les courbes expérimentales $i(t)$, $I_0 = 0,023 A$; l'intégration est faite sur la durée de l'acquisition de 0 à 0,030 s.

Les quatre courbes, i_1 , i_2 , i_{1mod} et i_{2mod} sont données par la figure 5. Dans le domaine $i > 0$, la courbe expérimentale et la courbe de la modélisation (croix) sont très proches à chaque fois.

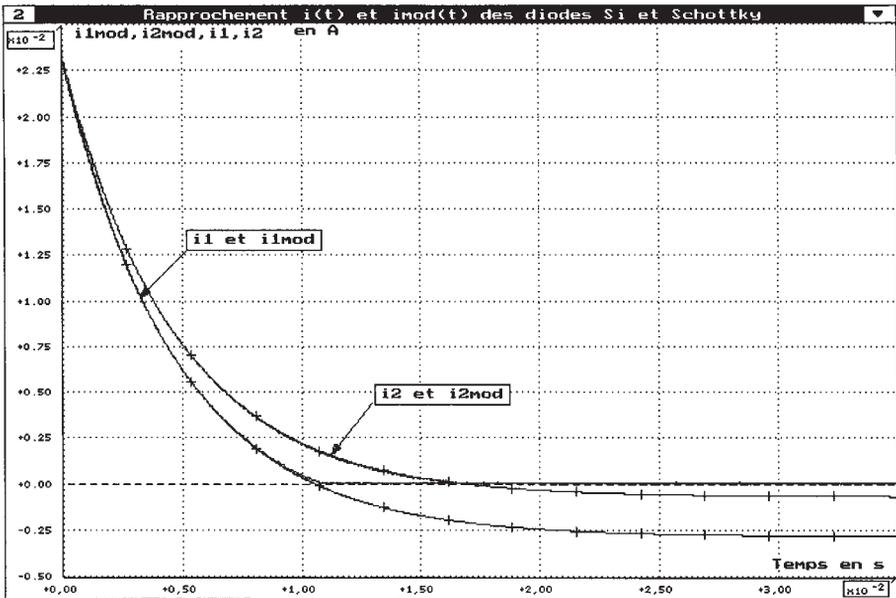


Figure 5

Dans le domaine $i < 0$ non défini physiquement ici, les courbes de la modélisation ont une asymptote parallèle à l'axe des abscisses et qui s'en rapproche quand u_s diminue.

2.4. Conclusion

Cette coïncidence des courbes $i(t)$ et $i_{mod}(t)$ donne une bonne vérification expérimentale de l'équation (1) et explique le rôle de la tension seuil de la diode utilisée : cette tension doit être la plus faible possible.

3. MONTAGE ASSIMILABLE À UNE DIODE SANS SEUIL

3.1. Schéma et étude

3.1.1. Schéma

On garde les mêmes composants. La diode silicium est maintenant associée à un amplificateur opérationnel et l'ensemble est placé entre A et M comme l'indique la figure 6. Ce montage met A au potentiel de E^- et M au potentiel de E^+ , on a :

$$u_{MA} = V_{E^+} - V_{E^-} = \varepsilon.$$

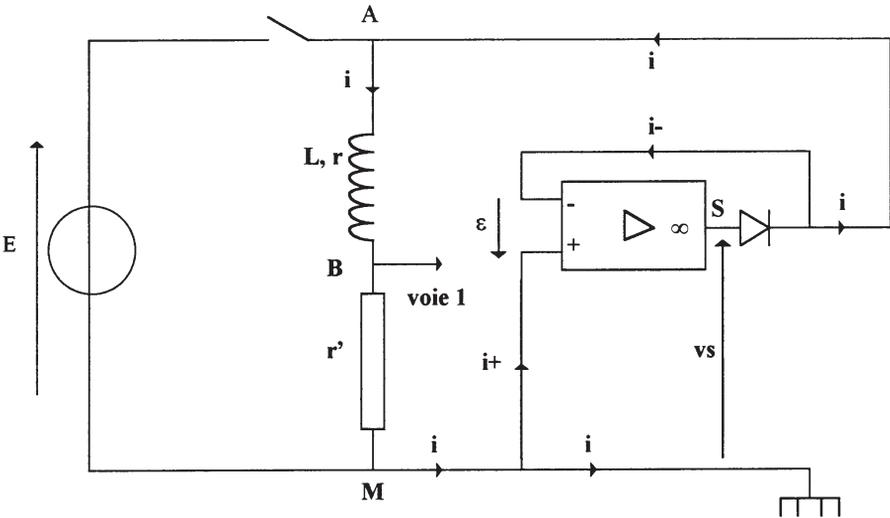


Figure 6

3.1.2. Étude

La tension aux bornes de la diode est $u_{SA} = u_{SM} + u_{MA} = v_s + \varepsilon$. La caractéristique de transfert d'un amplificateur opérationnel montre que la tension de sortie v_s est toujours de même signe que ε : u_{SA} a donc toujours ici le signe de $\varepsilon = u_{MA}$.

- **A t < 0**, lorsque l'interrupteur est fermé, **le dipôle (A,M) est récepteur** avec :

$$u_{AM} = E = 5,0 V \quad \text{et} \quad \varepsilon = u_{MA} = -5,0 V < 0 \quad ; \quad \text{donc} \quad u_{SA} < 0.$$

La tension $u_{SA} < 0$ polarise la diode en inverse : S est isolé de $E-$ et la contre-réaction ne peut se produire. ε garde sa valeur négative et **l'amplificateur opérationnel reste en régime saturé** avec $v_s = -v_{sat}$.

On peut vérifier avec un voltmètre, $\varepsilon \cong -5,0 V$ et $v_s = -v_{sat} \cong -13 V$.

- **A t ≥ 0**, dès que l'interrupteur est ouvert, **le dipôle (A,M) devient générateur** à cause du phénomène d'auto-induction : il tend à prolonger l'existence de i qui décroît avec :

$$u_{AM} = -e = L \cdot di/dt < 0 \quad \text{et} \quad \varepsilon = u_{MA} > 0 \quad ; \quad \text{donc} \quad u_{SA} > 0.$$

La tension $u_{SA} > 0$ polarise la diode en direct : S n'est plus isolé de $E-$ et la contre-réaction peut se faire. **L'amplificateur opérationnel bouclé, bascule en régime linéaire** et ε devient pratiquement nul.

Sur la maille ($M, E+, E-, S, M$), l'additivité des tensions successives donne :

$$0 + \varepsilon - u_s + v_s = 0 \quad ; \quad \text{et} \quad v_s = u_s = 0,60 V,$$

tension seuil de la diode silicium (peut être vérifié avec un voltmètre).

Avec $v_s = u_s = \text{constante}$ (dans le domaine de fonctionnement de la diode) $< v_{sat}$, l'amplificateur opérationnel reste en régime linéaire. On a alors :

$$v_s/\varepsilon = u_s/\varepsilon = A_0 \cong 10^5,$$

coefficient d'amplification différentielle de l'amplificateur opérationnel ; et

$$u_{MA} = \varepsilon = u_s / 10^5 \cong 6 \mu V \cong 0.$$

Le courant i , arrivant en M , passe dans la masse des alimentations de l'amplificateur opérationnel ; en A , le départ vers M de i impose l'arrivée du même courant i , venant de S et fourni par les alimentations de l'amplification opérationnel.

L'association (diode ; amplificateur opérationnel) est passante avec une tension entre ses bornes u_{MA} pratiquement nulle : **elle devient assimilable à une diode idéale sans seuil**. Ce dispositif permet donc de court-circuiter le dipôle (A,M) avec $u_{MA} = 0$.

Remarque : Pour vérifier l'exactitude de cette explication nous avons enregistré la courbe $v_s(t)$ en voie 2 de l'ordinateur au cours de la même acquisition, figure 7. Nous avons constaté en plus, qu'avec un amplificateur opérationnel de type TL 081, le bascu-

lement du régime saturé au régime linéaire, quasi instantané ($\delta t < 0,1 \text{ ms}$), n'est pratiquement pas visible sur la courbe $v_S(t)$: ce basculement ne perturbe pas la courbe $u_{BM} = r' \cdot i(t)$ de la voie 1, non représentée ici. Avec un amplificateur opérationnel plus ancien, type $\mu\text{A } 741$, le passage pour v_S de $-v_{sat}$ à u_S est bien visible ; il dure environ $0,5 \text{ ms}$ et déforme le début de la courbe de la voie 1, non représentée ici.

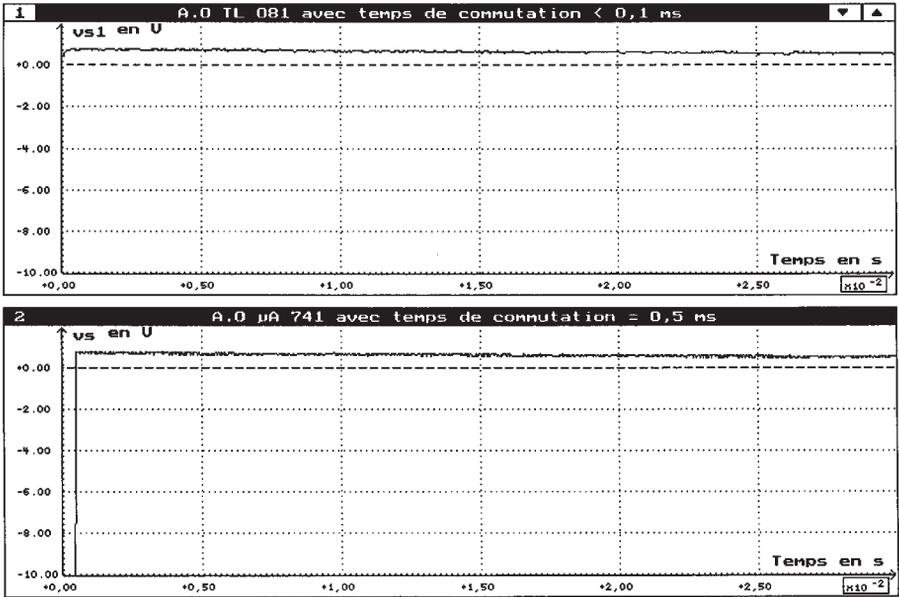


Figure 7

3.2. Enregistrement

On obtient pour $u_{BM}(t) = r' \cdot i(t)$ une courbe ayant l'allure d'une exponentielle décroissante admettant bien l'axe des abscisses pour asymptote. Avec la feuille de calcul on trace la courbe $i(t) = u_{BM} / r'$.

3.3. Modélisation

L'équation (1) précédente prend ici la forme souhaitée : $L \cdot di / dt + R \cdot i = 0$. On fait tracer sa solution i_{mod} avec les mêmes paramètres qu'au § 2.3. Les courbes de i et i_{mod} sont représentées sur la figure 8.

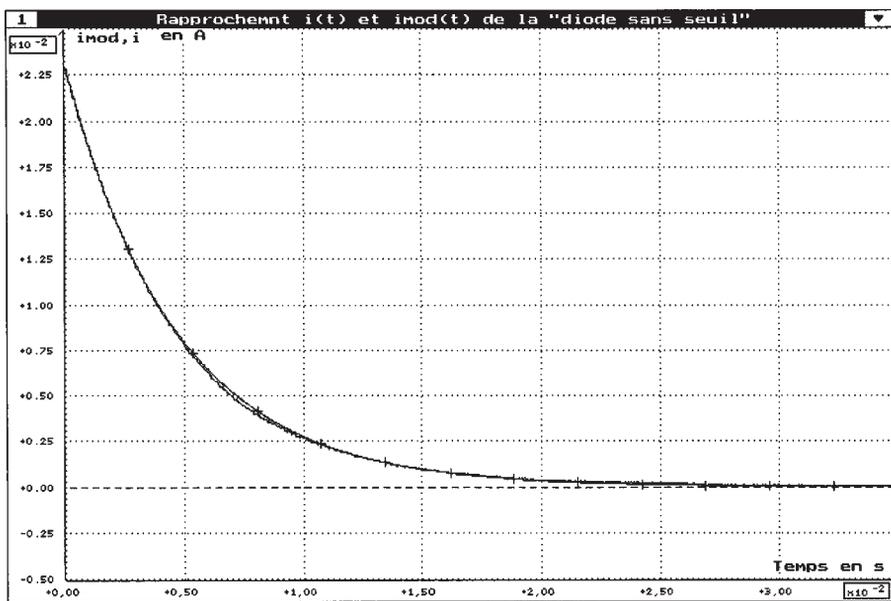


Figure 8

3.4. Conclusion

Le rapprochement des deux courbes montre que ce montage permet bien de visualiser fidèlement le phénomène recherché.

BIBLIOGRAPHIE

- Collection Durandeu - Terminale S - Éditions Hachette.
- R. BOURGERON : «1300 schémas et circuits électroniques» - Éditions Radio.