

A propos de la mise sous tension d'un transformateur à vide

par Michel FAIVRE et Anne-Lise EYRAUD
Lycée Jacques Duhamel - 39100 Dole

La mise sous tension d'un transformateur engendre dans certaines conditions, une valeur instantanée de l'intensité du courant appelé en ligne qui dépasse largement sa valeur nominale.

Le cas le plus défavorable est généralement évoqué (induction rémanente maximale et tension du réseau nulle à la mise sous tension). Il n'en est pas toujours ainsi.

Nous proposons un dispositif permettant l'observation de ce phénomène et mettant en évidence les conditions dans lesquelles la surintensité n'apparaît pas.

1. PRINCIPE DU DISPOSITIF

Le dispositif (figure 1) permet le réglage des instants d'enclenchement et de rupture de la tension u d'un transformateur T (220 V / 2×12 V, 38 VA). Il fait apparaître les allures du courant, de la tension et du flux, avant et pendant les quelques périodes du régime transitoire qui suit la mise sous tension. En rendant l'expérimentation répétitive, l'observation du flux rémanent est rendue possible [1].

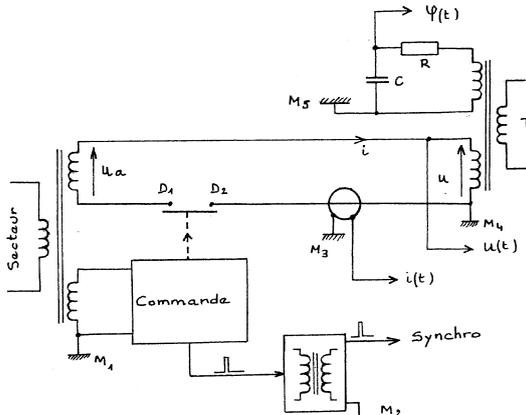


Figure 1 : Schéma de principe du dispositif expérimental.

L'interrupteur bidirectionnel D_1D_2 est commandé à l'ouverture et à la fermeture à partir de «tops» de référence fournis par le circuit de commande, synchronisés sur le réseau et espacés dans le temps d'un nombre entier de périodes (figure 2). Ces signaux provoquent le déclenchement du balayage de l'oscilloscope utilisé pour observer et mémoriser les images de $u(t)$, $i(t)$ ainsi que celle du flux $\varphi(t)$ obtenu par intégration ($R = 1 \text{ M}\Omega$, $C = 1 \text{ }\mu\text{F}$) [2] de la tension à vide aux bornes du second bobinage 12 V.

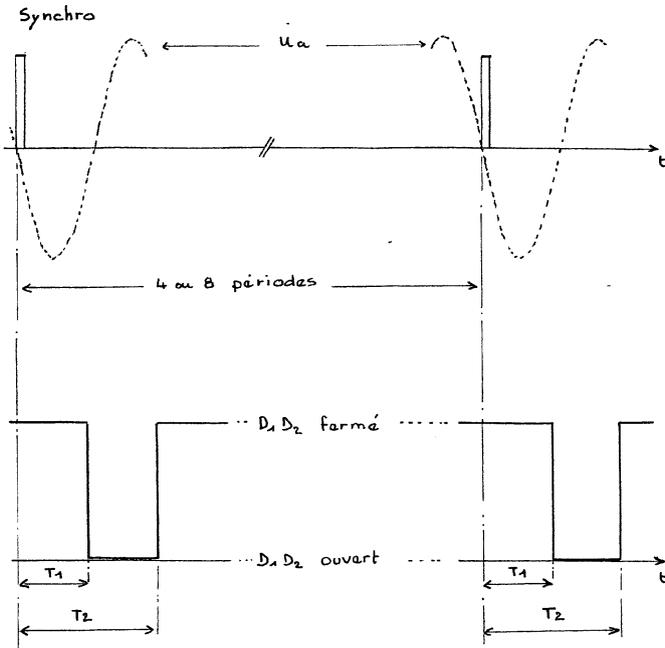


Figure 2 : Signaux délivrés par le circuit de commande et états de l'interrupteur.

Le circuit de commande (voir figure 10) permet le réglage des durées T_1 et T_2 donc le choix des instants d'ouverture et de fermeture de l'interrupteur D_1D_2 par rapport à la tension d'alimentation u_a .

Un transformateur d'impulsions et un capteur de courant à flux nul [3] rendent les potentiels de référence M_2 , M_3 , M_4 et M_5 totalement indépendants.

2. OUVERTURE DU CIRCUIT - FLUX RÉMANENT

2.1. Protection de l'interrupteur contre les surtensions

L'interrupteur D_1D_2 utilise la propriété des transistors MOSFET de puissance qui est de conduire dans les deux sens de par la présence de la diode intrinsèque (de structure). Pour être commandable à l'ouverture et à la fermeture dans les deux cas de polarisation, l'interrupteur est constitué de deux transistors MOSFET à sources communes, commandés par la tension de grille U_{GS} (figure 3) :

- lorsque $U_{GS} = 0$ l'interrupteur est ouvert,
- lorsque $U_{GS} >$ tension de seuil, l'interrupteur est fermé.

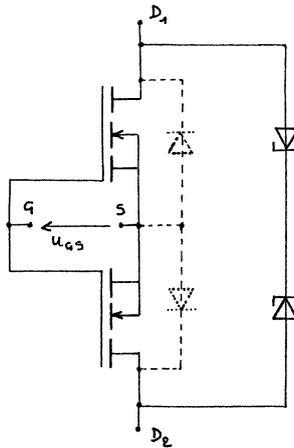


Figure 3 : Structure de l'interrupteur et de sa protection (en pointillé les diodes de structure).

L'ouverture du circuit, lorsque le courant n'est pas nul, donne naissance à des surtensions qui peuvent être destructives pour les transistors. On limite la valeur maximale de la tension $u_{D_1D_2}$ en plaçant aux bornes de l'interrupteur des diodes zener de tension caractéristique ($3 \times 9,1$ V) supérieure à la valeur maximale de u_a ($12\sqrt{2}$ V) mais inférieure à la tension que peut supporter un transistor (100 V).

2.2. Flux rémanent

Le flux rémanent dans le noyau magnétique du transformateur après ouverture du circuit, se positionne entre les valeurs $-\phi_{r \max}$ et $+\phi_{r \max}$ (figure 4) en fonction de l'instant choisi pour l'ouverture.

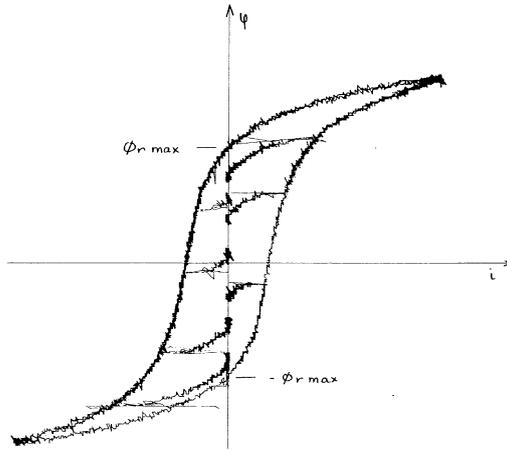


Figure 4 : Tracés superposés de différentes courbes de recul partant d'un point du cycle stabilisé (sélectionné par la valeur donnée à T_1) et aboutissant sur l'axe du flux (flux rémanent).

Le point représentant l'état magnétique du matériau se déplace sur une courbe ouverte appelée courbe de recul (courbe 0A figure 5a).

Pour mieux percevoir l'allure de cette courbe, nous avons recherché des conditions de fonctionnement s'en rapprochant :

- en plaçant aux bornes de l'interrupteur une impédance réglable qui limite l'intensité du courant après l'ouverture, le point figuratif décrit un cycle (figure 5b) qui se confond pratiquement avec la courbe de recul obtenue pour le même instant d'ouverture de l'interrupteur. Le même phénomène a pour effet de bloquer la valeur du flux rémanent au voisinage de $\pm \phi_{r \max}$ lorsque l'ouverture a lieu dans les parties extrêmes du cycle (saturation) ;
- de même, pour un instant d'ouverture donné, en agissant sur le réglage de l'instant de fermeture de l'interrupteur, on peut obtenir une courbe très proche de celle générée à l'ouverture (figures 5c et 5d).

3. FERMETURE DU CIRCUIT

3.1. Expression du flux après la mise sous tension

En négligeant les chutes de tension dues à la résistance et à la réactance de fuite du bobinage alimenté, le flux à travers une section

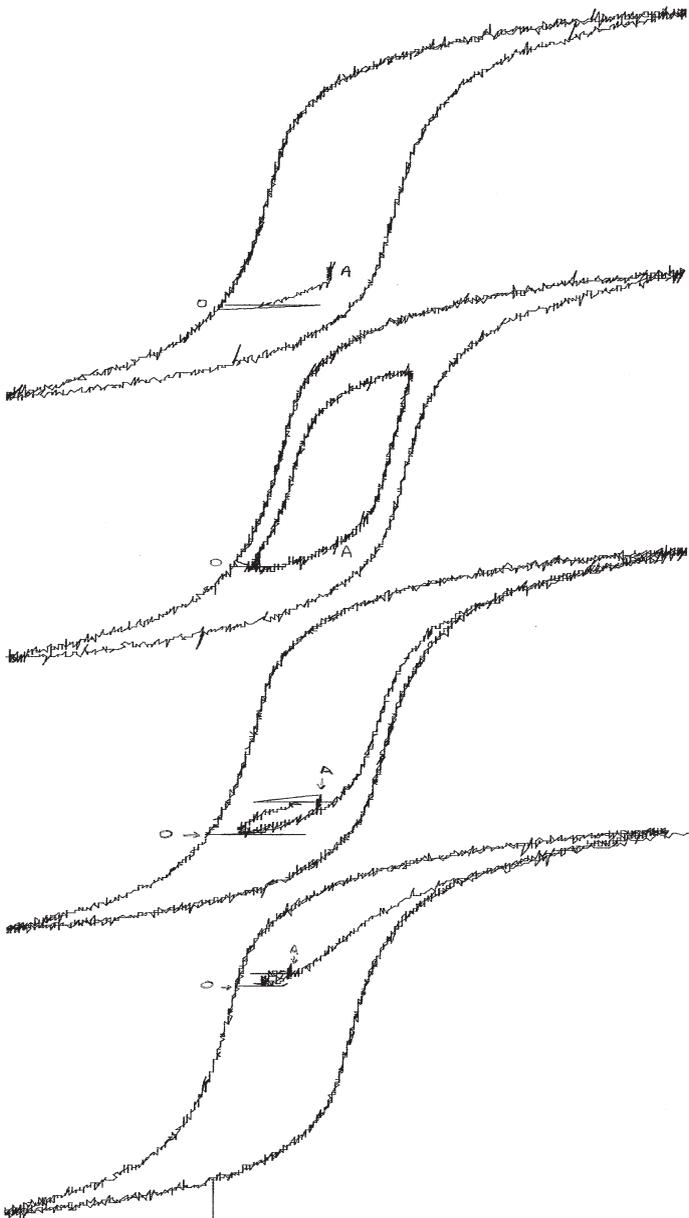


Figure 5a : Courbe de recul 0A.

Figure 5b : Cycle se superposant à la courbe de recul.

Figures 5c et 5d : Exemples de cheminements avoisinant la courbe de recul.

du circuit magnétique est lié à la tension d'alimentation par la relation (qui dépend des conventions d'orientation choisies) :

$$u = n \frac{d\varphi}{dt} = u_a = \hat{U} \sin(\omega t)$$

soit :
$$\varphi(t) = -\hat{\phi} \cos(\omega t) + \text{cste}$$

avec $\hat{\phi} = \frac{\hat{U}}{n\omega}$ et n nombre de spires du bobinage.

Après un certain nombre de périodes de fonctionnement, le régime transitoire s'amortit, la constante d'intégration disparaît, le flux devient sinusoïdal, imposé par la tension.

Après l'ouverture (instant t_0) le flux se stabilise à la valeur notée φ_0 en général différente de $-\hat{\phi} \cos(\omega t_0)$ (figures 4 et 5) sauf dans le cas de l'ouverture à $i = 0$.

A la mise sous tension (instant t_f) :

$$\varphi(t_f) = \varphi_0 = -\hat{\phi} \cos(\omega t_f) + \text{cste}$$

soit :
$$\text{cste} = \varphi_0 + \hat{\phi} \cos(\omega t_f)$$

Alors, immédiatement après la fermeture ($t \geq t_f$) :

$$\varphi(t) = -\hat{\phi} \cos(\omega t) + \hat{\phi} \cos(\omega t_f) + \varphi_0$$

La figure 6 illustre cette fonction.

3.2. Mise sous tension sans pointe d'intensité

Elle se produit lorsque $\hat{\phi} \cos(\omega t_f) + \varphi_0 = 0$ (exemples théoriques de t_{f2} , t_{f4} , t_{f2} , t_{f4}).

Alors $\varphi(t)$ reste entre $\pm \hat{\phi}$ comme pour le régime permanent.

Les instants de fermeture t_f doivent être ajustés à chaque valeur de φ_0 fixée par la phase de la tension d'alimentation à t_0 . Les figures 7a, 7b, 7c, 7d vérifient la condition $\varphi_0 = -\hat{\phi} \cos(\omega t_f)$.

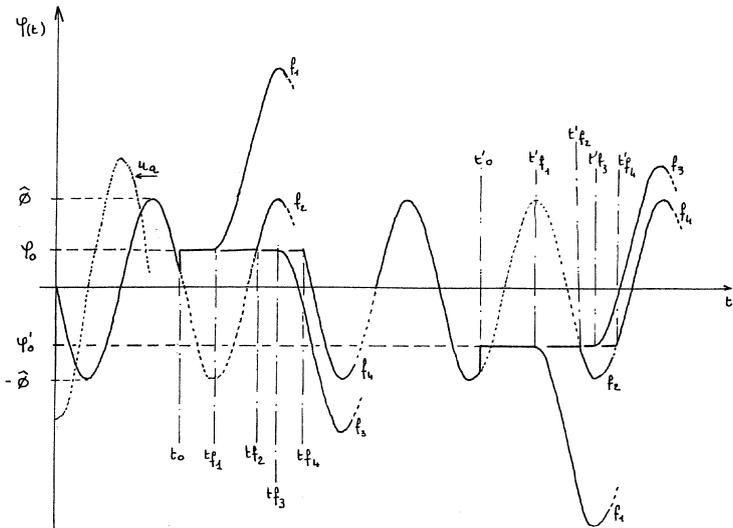


Figure 6 : Représentation de la fonction $\varphi(t)$ pour deux valeurs de l'instant d'ouverture (t_0 et t'_0) pour lesquelles le flux rémanent sera φ_0 et φ'_0 : dans chacun des deux cas plusieurs instants de mise sous tension ont été envisagés (t_{f_1}, \dots, t_{f_4} ; $t'_{f_1}, \dots, t'_{f_4}$).

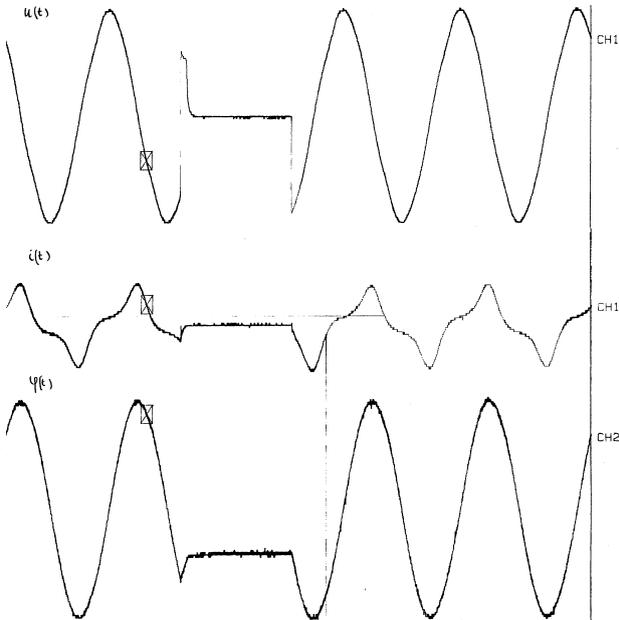


Figure 7a

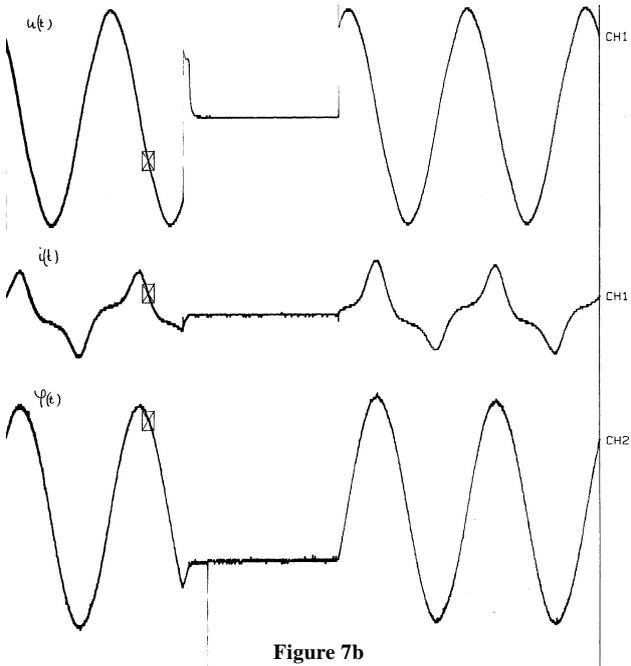


Figure 7b

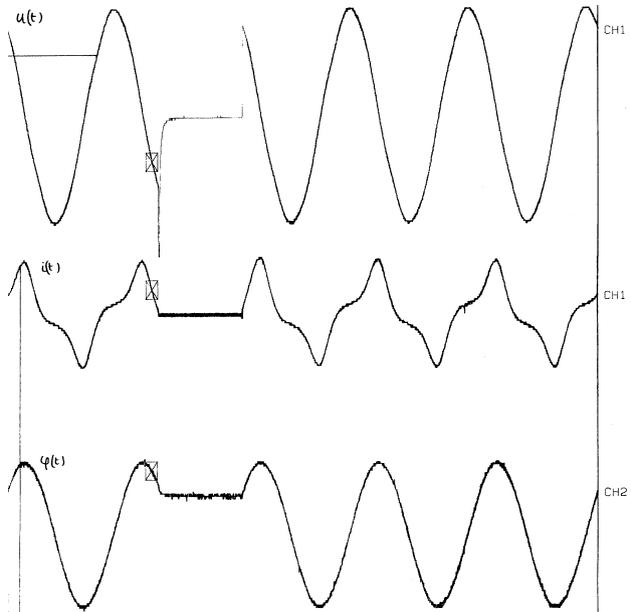


Figure 7c

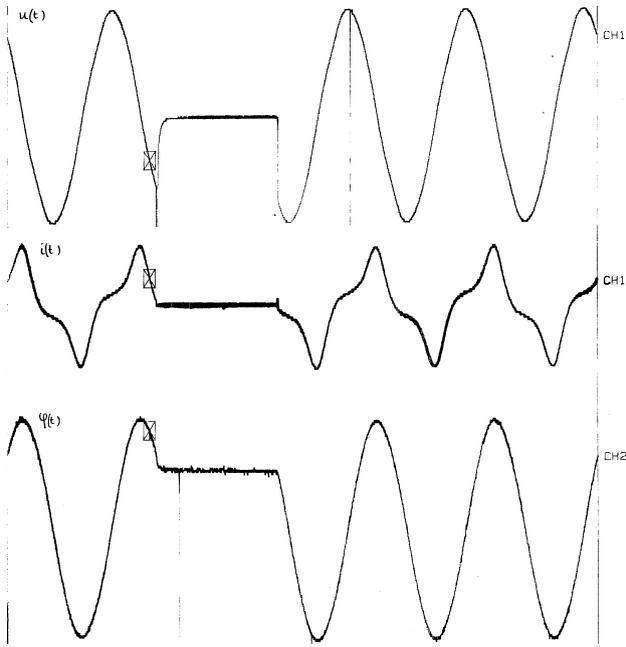


Figure 7d

Figures 7a - 7b - 7c - 7d : Oscillogrammes des grandeurs $u(t)$, $i(t)$ et $\varphi(t)$ dans les conditions de mise sous tension sans pointe d'intensité.

3.3. Mise sous tension avec surintensité

Si la condition précédente $(-\hat{\phi} \cos(\omega t_f) = \varphi_0)$ n'est pas respectée, alors $\varphi(t)$ après fermeture dépasse $+\hat{\phi}$ ou $-\hat{\phi}$ d'une quantité plus ou moins importante pouvant aller en théorie jusqu'à $\phi_{r \max} + 2\hat{\phi}$ ($\phi_{r \max}$ étant la valeur limite de φ_0) lorsque l'instant de fermeture t_f correspond à un extremum ($\pm \hat{\phi}$) du flux, ce qui correspond à une tension u_a nulle.

Ainsi, la plus forte intensité est obtenue lorsque :

$$\varphi_0 = \phi_{r \max} \quad \text{et} \quad u_a(t_f) = 0 \quad \text{avec} \quad \left(\frac{du_a}{dt} \right)_{t_f} > 0$$

$$\text{ou :} \quad \varphi_0 = -\phi_{r \max} \quad \text{et} \quad u_a(t_f) = 0 \quad \text{avec} \quad \left(\frac{du_a}{dt} \right)_{t_f} < 0$$

La figure 8 illustre ce deuxième cas.

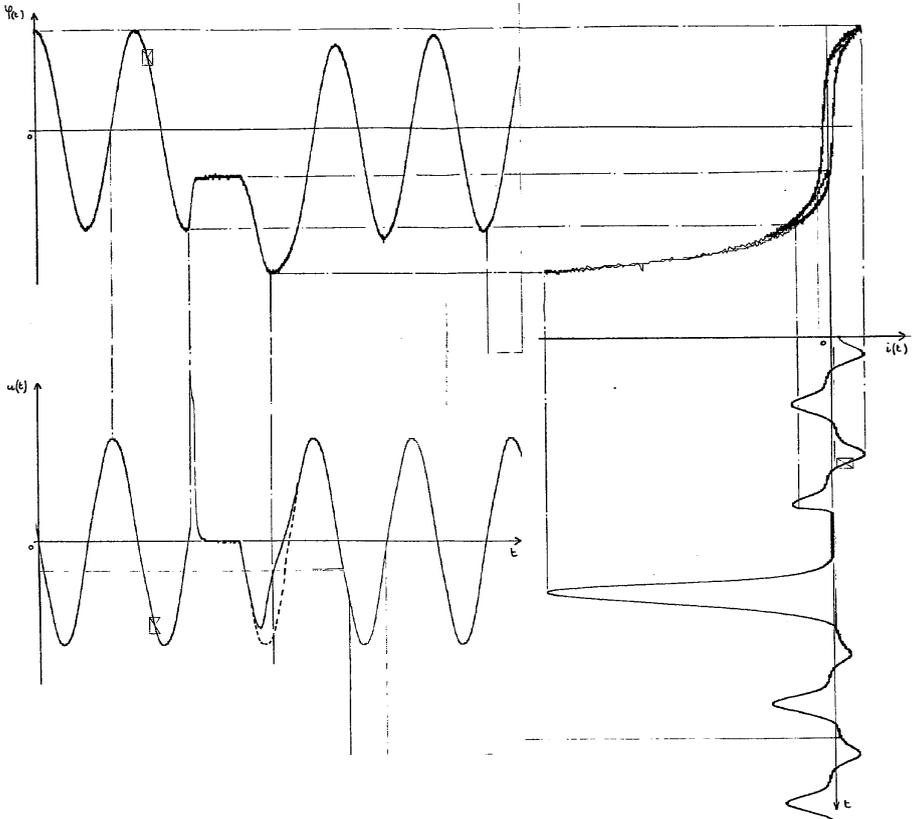


Figure 8 : Oscillogrammes du flux $\phi(t)$, de la tension $u(t)$ et de l'intensité du courant $i(t)$, dans les conditions d'obtention de la plus forte surintensité.

Remarque : Les valeurs extrêmes des maxima du flux observées expérimentalement, ne correspondent pas à $\phi_0 + 2\hat{\phi}$ car la surintensité entraîne une réduction du flux provoquée : d'une part, par la chute de tension u_a aux bornes du secondaire du transformateur d'alimentation et d'autre part, par la chute ohmique du bobinage alimenté accompagnée de l'effet d'amortissement du régime transitoire.

CONCLUSION

Par une méthode entièrement expérimentale et à l'aide du dispositif décrit à la figure 1, nous pouvons observer en temps réel l'importance

de la surintensité à la mise sous tension du transformateur et son évolution en fonction des paramètres suivants :

- sens et valeur de l'induction rémanente (instant de la coupure),
- sens de variation et valeur instantanée de la tension d'alimentation (instant de la mise en service).

Cette étude peut être complétée en faisant apparaître l'effet :

- de la nature du circuit magnétique,
- de la charge du transformateur.

Enfin, en réglant l'instant d'ouverture de manière à démagnétiser complètement le fer et en fermant le circuit lorsque $u_a = 0$, on obtient le tracé de la courbe de première aimantation (figure 9).

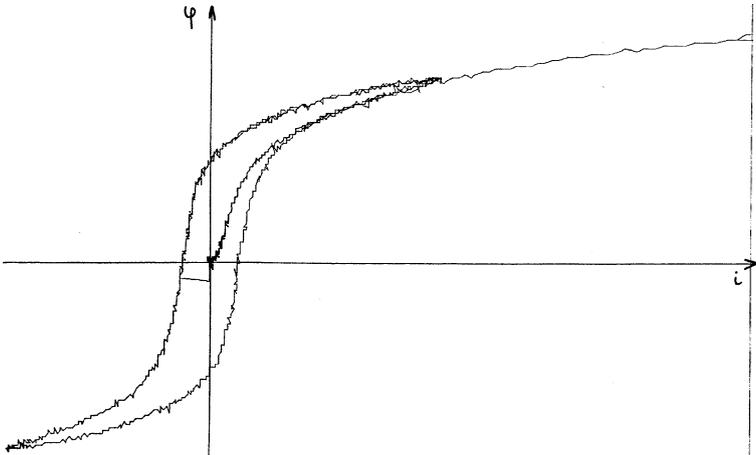


Figure 9 : Cycle stabilisé et courbe de première aimantation.

ANNEXE : CIRCUIT DE COMMANDE (figure 10)

L'image de la tension d'alimentation u_a est limitée par une diode zener et mise en forme par un trigger de Schmitt (4093). Elle sert de signal d'horloge au compteur (4024). Le bouclage de la sortie (Q_3 ou Q_4) sur la RAZ génère des «tops» de synchronisation et de commande, de largeur adaptable (circuit R-C) au produit ET ($600 \text{ V } \mu\text{s}$) du transformateur d'impulsions. Ces signaux commandent le déclenche-

ment de l'oscilloscope et des deux monostables (4528) dont les durées des impulsions de sortie (T_1 et T_2) sont déterminées par les composants extérieurs (R_1 , C_1 et R_2 , C_2). La combinaison de ces deux sorties par un OU exclusif (4070) fournit la tension de commande grille-source U_{GS} des transistors (IRF 530).

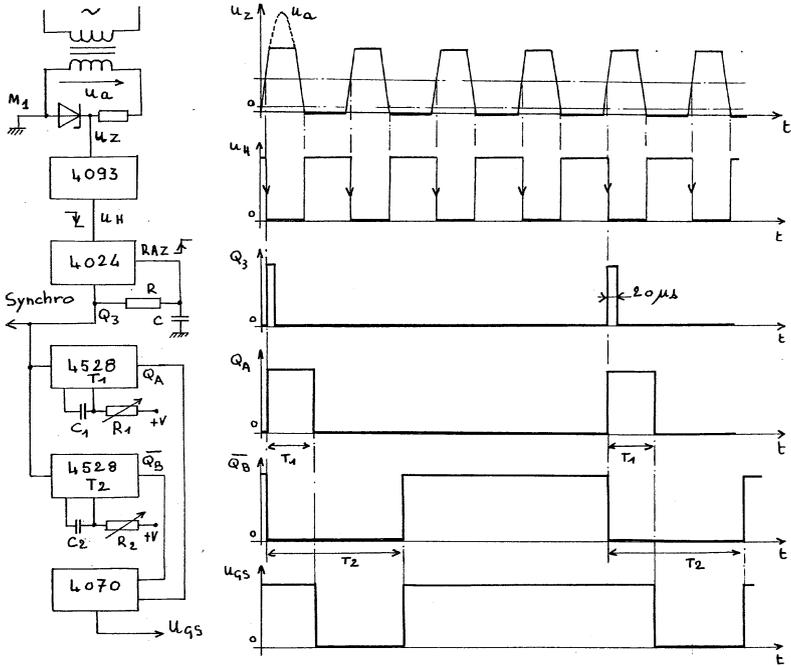


Figure 10 : Schéma du circuit de commande.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] R. LAAGEL et M. LEHMANN : «*Module pour l'étude et l'analyse des phénomènes transitoires dans les circuits RC, RL, RLC*», B.U.P. n° 702, mars 1988.
- [2] J.-P. CARON et P. DEGOBERT : «*Prise en compte de l'hystérésis dans l'étude comportementale du transformateur monophasé*», B.U.P. n° 764, mai 1994.
- [3] J.-P. CARON et M. VROMAN : «*Méthode moderne de captage isolé d'un courant fort : shunt électronique à flux nul*», B.U.P. n° 748, novembre 1992.