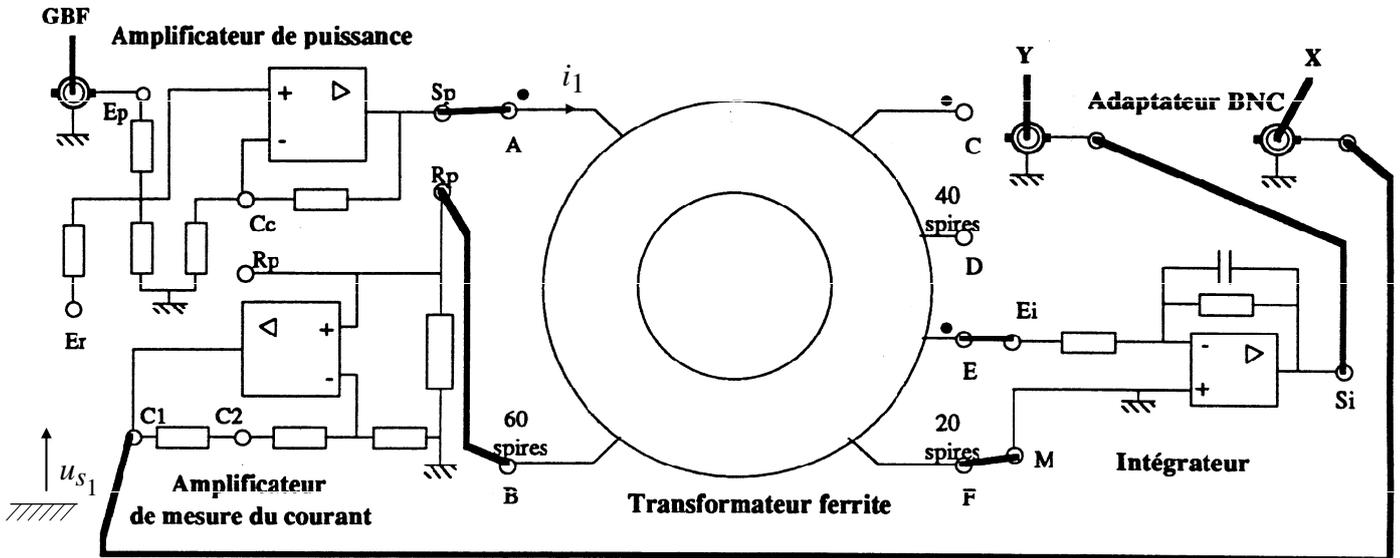


# T.P. n° 10 : CYCLES D'HYSTÉRÉSIS

## I – ÉTUDE THÉORIQUE

### 1) Introduction

Soit le montage ci-dessous (ne pas le réaliser pour l'instant).



L'*amplificateur de puissance* se comporte comme une source de tension ; il est branché au circuit primaire (qui comporte  $N_1$  spires) d'un transformateur.

### 2) Amplificateur de mesure du courant

L'*amplificateur de mesure du courant* délivre une tension de sortie  $u_{s1}$  proportionnelle au courant  $i_1$  qui circule dans le circuit primaire :

$$u_{s1} = Z_t i_1 \quad \text{avec} \quad Z_t = 100 \text{ V} \cdot \text{A}^{-1}$$

Cette tension  $u_{s1}$  est envoyée en voie 1 d'un oscilloscope.

On va montrer que cette tension  $u_{s1}$  est proportionnelle à l'excitation magnétique  $H$  qui règne dans le circuit magnétique en forme de tore.

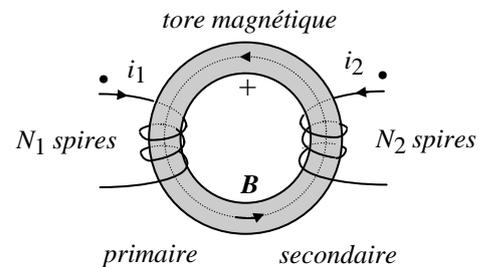
#### **Théorème d'Ampère :**

On applique le théorème d'Ampère le long d'une ligne de champ  $H$  dans le tore :

$$\oint_{\Gamma} \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = i_{\text{enlacé}}$$

$$\oint_{\Gamma} \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = H \ell \quad \ell : \text{longueur moyenne du circuit magnétique}$$

$$i_{\text{enlacé}} = N_1 i_1 + N_2 i_2$$



En raison de l'intégrateur branché à la sortie du secondaire (la résistance  $R$  vaut  $2,7 \text{ k}\Omega$ ), le courant  $i_2$  est négligeable devant le courant  $i_1$ .

$$H \ell = N_1 i_1 \quad H = \frac{N_1 i_1}{\ell} \quad \text{Or :} \quad u_{s1} = Z_t i_1$$

$$H = \frac{N_1}{\ell Z_t} u_{s1}$$

L’excitation magnétique  $H$  est proportionnelle à la tension  $u_{s1}$  délivrée par l’amplificateur de mesure du courant.

### 3) Intégrateur

L’intégrateur est branché à la sortie du secondaire ; il intègre et inverse la tension  $u_2$  aux bornes du secondaire.

Montrer que les tensions complexes  $\underline{u_2}$  et  $\underline{u_{s2}}$  sont reliées par la relation :

$$\frac{\underline{u_{s2}}}{\underline{u_2}} = - \frac{\frac{R'}{R}}{1 + j R' C \omega}$$

Application numérique :  $R = 2,7 \text{ k}\Omega$  ;  $R' = 10 \text{ M}\Omega$  ;  $C = 1 \text{ }\mu\text{F}$  ; fréquence  $f = 20 \text{ Hz}$

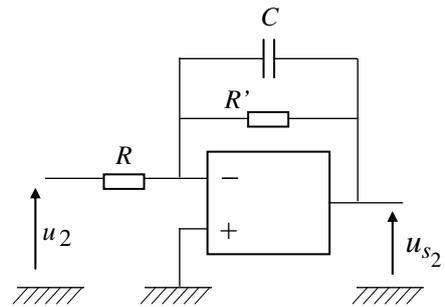
Vérifier que :  $R' C \omega \gg 1$

Si cette condition est vérifiée :

$$\frac{\underline{u_{s2}}}{\underline{u_2}} = - \frac{\frac{R'}{R}}{j R' C \omega} \frac{\underline{u_{s2}}}{\underline{u_2}}$$

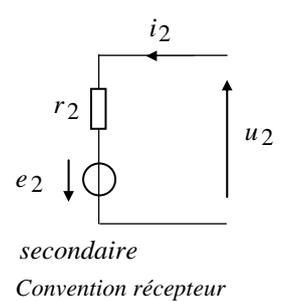
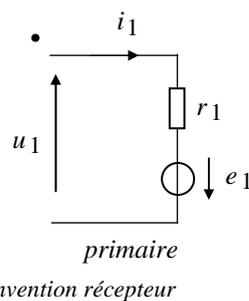
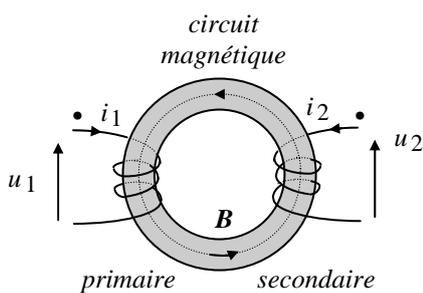
$$\frac{\underline{u_{s2}}}{\underline{u_2}} = - \frac{1}{j R C \omega}$$

$$\underline{u_{s2}} = - \frac{1}{R C} \frac{\underline{u_2}}{j \omega}$$



$$u_{s2} = - \frac{1}{R C} \int u_2 dt$$

### 4) Relation entre le champ magnétique $B$ dans le tore et la tension de sortie de l’intégrateur



$$u_2 = r_2 i_2 - e_2$$

avec :  $e_2 = - \frac{d\Phi_2}{dt}$

et  $\Phi_2 = N_2 \Phi_c$

$\Phi_c$  est le flux commun :  $\Phi_c = \iint_S \vec{B} \cdot d\vec{S}$

On fait l’hypothèse que le champ magnétique  $B$  est uniforme sur toute section du tore magnétique :

$$\iint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = B S$$

$$\Phi_2 = N_2 B S$$

$$e_2 = - N_2 S \frac{dB}{dt}$$

En raison de l’intégrateur branché à la sortie du secondaire (la résistance  $R$  vaut  $2,7 \text{ k}\Omega$ ), la tension  $r_2 i_2$  est négligeable devant la f.é.m.  $e_2$ .

$$u_2 = - e_2$$

$$u_2 = N_2 S \frac{dB}{dt}$$

L’intégrateur délivre une tension de sortie  $u_{s_2}$  telle que :

$$u_{s_2} = -\frac{1}{RC} \int u_2 dt$$

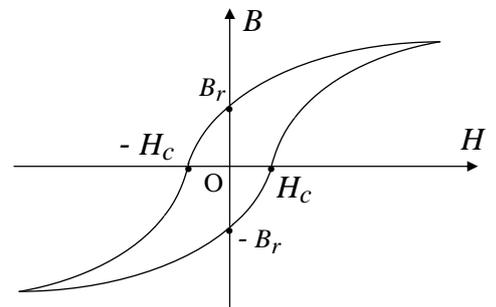
$$u_{s_2} = -\frac{1}{RC} \int N_2 S \frac{dB}{dt} dt$$

$$u_{s_2} = -\frac{N_2 S}{RC} B$$

**La tension de sortie  $u_{s_2}$  de l’intégrateur est proportionnelle et de signe contraire au champ magnétique  $B$  dans le tore.**

**5) Conclusion**

- On envoie la tension de sortie  $u_{s_1}$  de l’amplificateur de mesure du courant en voie 1 de l’oscilloscope car elle est proportionnelle à l’excitation magnétique  $H$  dans le circuit magnétique.
- On envoie la tension de sortie  $u_{s_2}$  de l’intégrateur en voie 2 de l’oscilloscope car elle est proportionnelle au champ magnétique  $B$  dans le circuit magnétique.
- On met l’oscilloscope en mode  $XY$ ; on voit alors le cycle d’hystérésis du matériau constituant le circuit magnétique ( $B$  en fonction de  $H$ ).



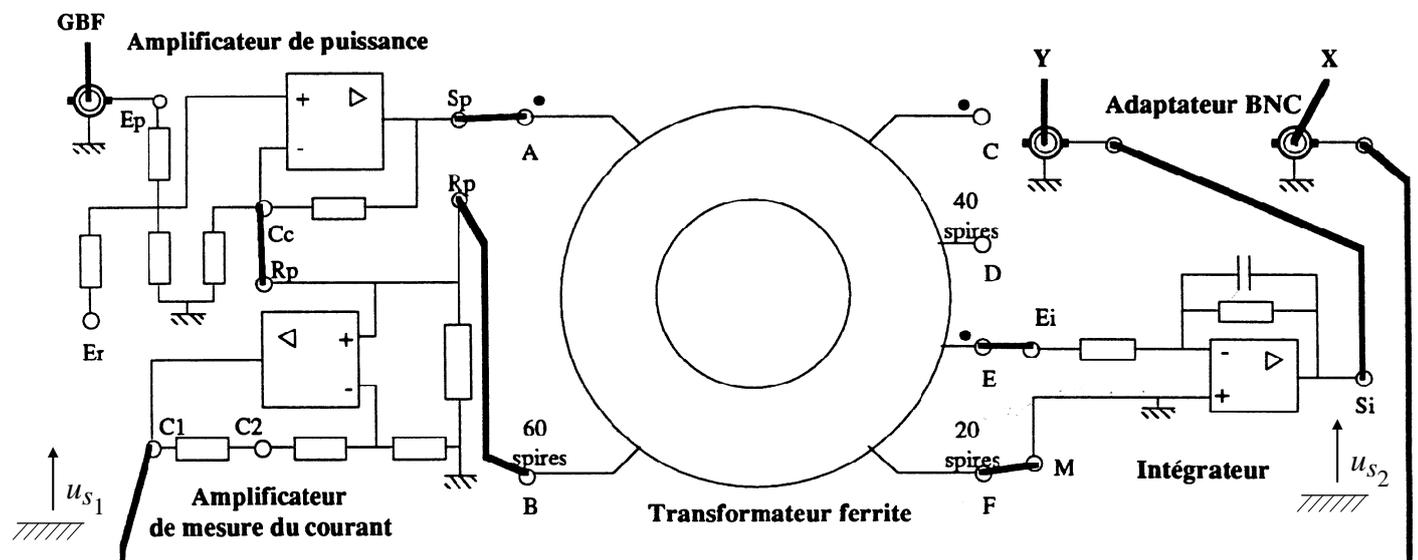
**II – MANIPULATIONS AVEC LE TRANSFORMATEUR EN FERRITE**

**1) Amplificateur de puissance fonctionnant en source de courant**

L’amplificateur de puissance ne fonctionne pas correctement en source de tension. Par contre, il fonctionne correctement en source de courant.

a) Montage :

- Relier les bornes Cc et Rp par un fil. L’amplificateur de puissance fonctionne alors en **source de courant**.
- Choisir une fréquence de 50 Hz pour le GBF.



**b) Observation du cycle d'hystérésis :**

- Envoyer sur la voie 1 de l'oscilloscope la tension de sortie  $u_{s_1}$  de l'*amplificateur de mesure du courant*.
- Envoyer sur la voie 2 de l'oscilloscope la tension de sortie  $u_{s_2}$  de l'intégrateur.
- Mettre l'oscilloscope en mode *XY* et observer le cycle d'hystérésis.  
En réalité, ce cycle est à l'envers en raison du signe – dû à l'intégrateur-inverseur. Il faut donc inverser la voie 2 sur l'oscilloscope pour avoir le cycle dans le bon sens.
- Faire varier la tension de sortie du G.B.F. et observer le cycle d'hystérésis.
- Augmenter la fréquence du G.B.F. et observer l'élargissement du cycle d'hystérésis.
- Revenir à une fréquence de 50 Hz pour le G.B.F. .

**Faire les observations des paragraphes c) et d) tout à la fin du TP, s'il vous reste du temps.**

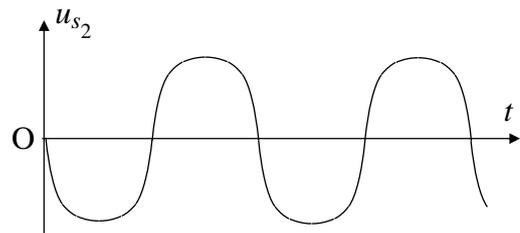
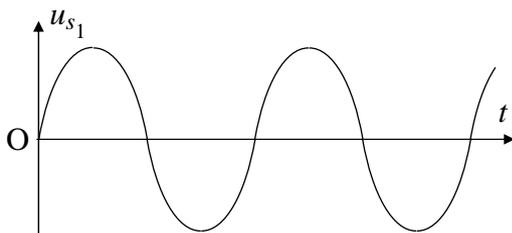
**c) Observation de la tension  $u_1$  et du courant  $i_1$  dans le circuit primaire :**

- Observer à l'oscilloscope :
  - la tension  $u_1$  aux bornes du primaire (en réalité entre la borne Sp et la masse du montage),
  - la tension de sortie  $u_{s_1}$  de l'*amplificateur de mesure du courant*
- Faire varier la tension de sortie du G.B.F. . Le système est-il linéaire ?

**d) Observation du courant  $i_1$  dans le circuit primaire et de la tension de sortie  $u_{s_2}$  de l'intégrateur :**

Modifier le branchement comme indiqué ci-dessous.

- Observer à l'oscilloscope :
  - la tension de sortie  $u_{s_1}$  de l'*amplificateur de mesure du courant*  $i_1$  .
  - la tension de sortie  $u_{s_2}$  de l'intégrateur.
- Faire varier la tension de sortie du G.B.F. et vérifier que :
  - la tension de sortie  $u_{s_1}$  de l'*amplificateur de mesure du courant* reste sinusoïdale (c'est normal car l'amplificateur de puissance fonctionne en source de courant),
  - la tension de sortie  $u_{s_2}$  de l'intégrateur s'aplatit quand le courant  $i_1$  dans le primaire augmente (c'est dû au phénomène de saturation : quand le courant  $i_1$  croît, le champ magnétique  $B$  tend vers une limite  $B_{sat}$ ).



## 2) Acquisition avec Synchronie des tensions de sortie de l'*amplificateur de mesure du courant* et de la tension de sortie de l'intégrateur

- Vérifier que la fréquence du G.B.F. est bien égale à 50 Hz.
- Régler la tension de sortie du G.B.F. de telle sorte que l'amplitude de la tension de sortie  $u_{s_1}$  de l'*amplificateur de mesure du courant* soit égale à 6 V (lire cette tension à l'oscilloscope).

**NE PAS DÉPASSER CETTE VALEUR SOUS PEINE DE DÉTRUIRE LA CARTE D'ACQUISITION (QUI COÛTE ENVIRON 1000 €)**

- Vérifier que l'amplitude de la tension de sortie  $u_{s_2}$  de l'intégrateur ne dépasse pas 8 V (lire cette tension à l'oscilloscope).
- Envoyer la tension de sortie  $u_{s_1}$  de l'amplificateur de mesure du courant sur l'entrée EA0 de la carte d'acquisition ; choisir le mode d'acquisition automatique et enlever la coche dans la case de la fenêtre 1 car cette tension (proportionnelle à l'excitation magnétique  $H$ ) sera envoyée en abscisse de la fenêtre 1 .
- Envoyer la tension de sortie  $u_{s_2}$  de l'intégrateur sur l'entrée EA1 de la carte d'acquisition ; choisir le mode d'acquisition automatique et cocher la case de la fenêtre 1 car cette tension (proportionnelle au champ magnétique  $H$ ) sera envoyée en ordonnée de la fenêtre 1 .
- Régler le nombre de points d'acquisition à sa valeur maximale et régler la durée d'échantillon (durée entre deux points d'acquisition) à sa valeur minimale.
- Dans « Fenêtre », choisir en abscisse la grandeur EA0.
- Acquérir les deux tensions et observer le cycle d'hystérésis (ce cycle est à l'envers en raison du signe – dû à l'intégrateur-inverseur).

### 3) Tracé du cycle d'hystérésis (champ magnétique $B$ en fonction de l'excitation magnétique $H$ )

On veut connaître les variations du champ magnétique  $B$  en fonction de l'excitation magnétique  $H$ .

- Définir dans la feuille de calcul de Synchronie les variables  $H$  et  $B$  par les relations :

$$H = \frac{N_1}{\ell Z_t} EA0$$

avec :  $N_1 = 60$  spires ;  $\ell = 158,7$  mm ;  $Z_t = 100$  V . m<sup>-1</sup>

$$B = -\frac{RC}{N_2 S} EA1$$

avec :  $R = 2,7$  k $\Omega$  ;  $C = 1$   $\mu$ F ;  $N_2 = 20$  spires ;  $S = 312,5$  mm<sup>2</sup>

- Dans « Courbe », définir dans la fenêtre 2 la courbe  $B$  en fonction de  $H$ .
- Observer le cycle d'hystérésis  $B$  fonction de  $H$  dans la fenêtre 2 et relever les valeurs du champ rémanent  $B_r$  et de l'excitation magnétique coercitive  $H_c$ .

### 4) Tracé du cycle d'hystérésis (aimantation $M$ en fonction de l'excitation magnétique $H$ )

On veut connaître les variations de l'aimantation  $M$  en fonction de l'excitation magnétique  $H$ .

- Définir dans la feuille de calcul la variable  $M$  par la relation :

$$M = \frac{B}{\mu_0} - H \quad \text{avec : } \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$$

- Dans « Courbe », définir dans la fenêtre 3 la courbe  $M$  en fonction de  $H$ .
- Observer le cycle d'hystérésis  $M$  fonction de  $H$  dans la fenêtre 3 et relever les valeurs de l'aimantation rémanente  $M_r$  et de l'excitation magnétique coercitive  $H_c$ .

## III – MANIPULATIONS AVEC LE TRANSFORMATEUR EN FER

Refaire les mesures précédentes après avoir remplacé le transformateur en ferrite par le transformateur en fer et en abaissant la fréquence à environ 10 Hz .

- Observer le cycle d'hystérésis  $B$  fonction de  $H$  dans la fenêtre 2 et relever les valeurs du champ rémanent  $B_r$  et de l'excitation magnétique coercitive  $H_c$ .
- Observer le cycle d'hystérésis  $M$  fonction de  $H$  dans la fenêtre 3 et relever les valeurs l'aimantation rémanente  $M_r$  et de l'excitation magnétique coercitive  $H_c$ .