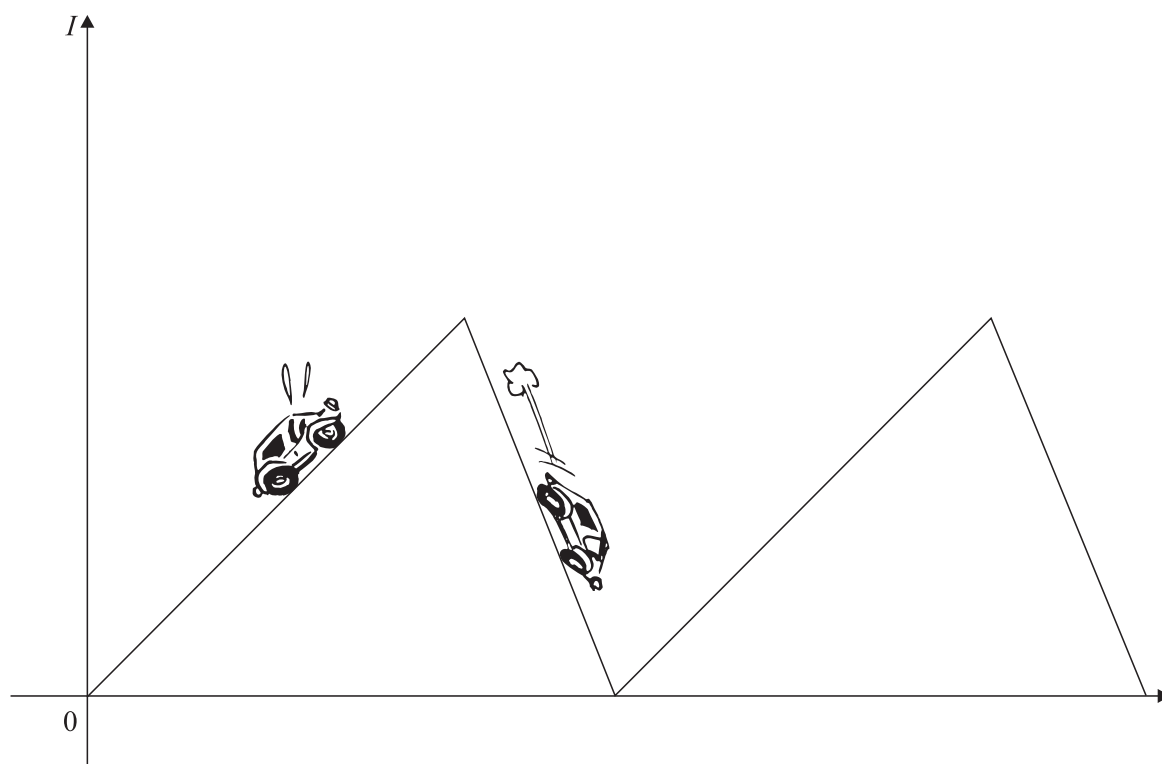


Loi de Lenz-Faraday

Étude quantitative du phénomène d'induction électromagnétique

ET 2310 11101



Mode d'emploi et résultats expérimentaux



Centre technique et pédagogique
de l'Enseignement de la Communauté française



Avant-propos

Le montage décrit dans les pages qui vont suivre permet une étude quantitative du phénomène d'induction électromagnétique, rapide et d'une précision acceptable.

Il n'utilise qu'un matériel réduit, facile à monter, dont la majeure partie, en particulier les éléments les plus coûteux, appartient au matériel usuel des écoles.

Il peut être utilisé soit comme matériel de démonstration, soit comme montage pour les expériences d'élèves.

A. FRÈRE
Janvier 1999

Loi de Lenz-Faraday

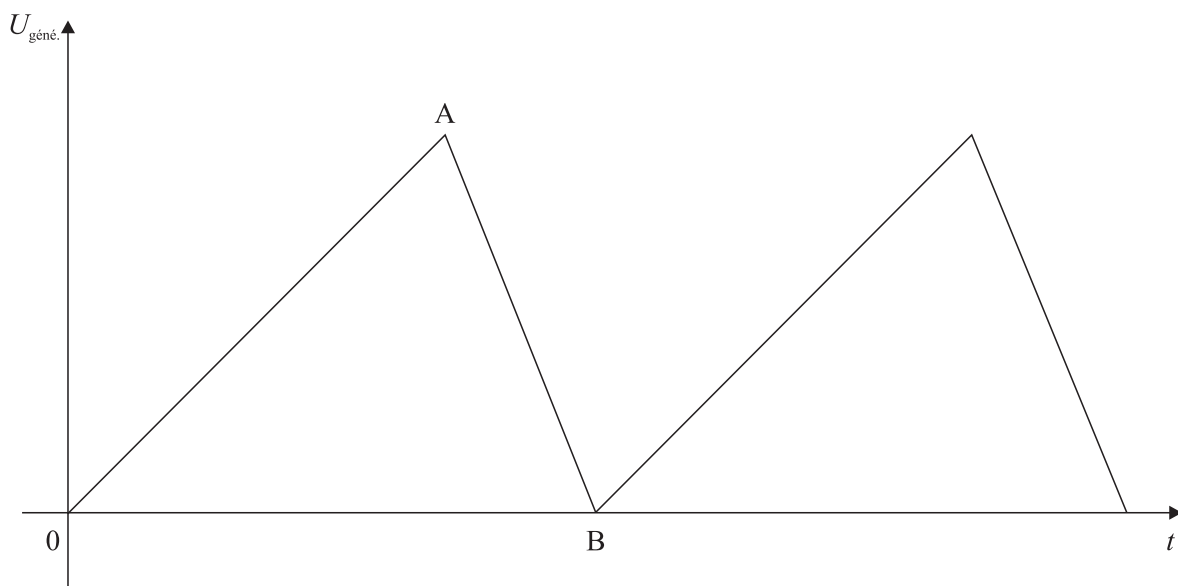
Étude quantitative du phénomène d'induction électromagnétique

Le matériel ET 2310 11101 comprend:

- un générateur de rampes asymétriques ET 2300 11145;
- un résistor 1 k Ω ET 2301 11101;
- un résistor 10 k Ω ET 2301 11201.

1. Le générateur de rampes asymétriques¹

Alimenté par le réseau 230 V-50 Hz, il engendre entre ses bornes une différence de potentiel $U_{\text{gén.}}$ liée au temps par une relation décrite par le graphe 1 ci-dessous²:



Graphe 1

Un commutateur à quatre positions permet de faire varier, de manière discontinue, le rapport des pentes des droites 0A et AB.

¹ Au Centre technique et pédagogique. S'y adresser: Route de Bavay, 70 - 7080 FRAMERIES - Tél.: 065 66 73 22 - 065 67 62 61 - Télécopieur: 065 66 14 21.

² L'une des bornes du générateur, mise à la «terre», reste au potentiel zéro. Le potentiel de l'autre borne passe par des maximums alternativement positifs et négatifs. Le phénomène étudié n'étant lié qu'aux pentes des «rampes» du graphique et la position de la trace horizontale (sur l'oscilloscope) pouvant être modifiée par la commande appropriée, il nous a semblé plus simple et plus clair de présenter les choses comme sur le graphe 1.

2. Étude quantitative du phénomène d'induction électromagnétique

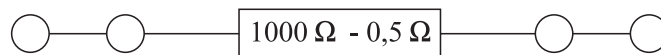
2.1. Matériel nécessaire

- Le générateur de rampes asymétriques ET 2300 11145.
- Un oscilloscope cathodique, de préférence à deux canaux.
- Deux bobines identiques, de 500 ou 600 spires.
- Une bobine de 250 ou 300 spires, ou d'un autre nombre de spires, de même géométrie que les précédentes (facultative).
- Un noyau rectiligne feuilleté, ferromagnétique, adapté aux bobines (si possible un peu plus court que la somme des longueurs des deux bobines).

Remarque: les bobines et le noyau en question peuvent être empruntés à l'ensemble «transformateur démontable», présent dans la plupart des écoles.

- Une résistance purement ohmique, d'environ $1000\ \Omega$ - 0,5 W ET 2301 11101.

Il est commode de disposer d'une résistance montée sur un socle et munie de bornes enfichables doubles³.



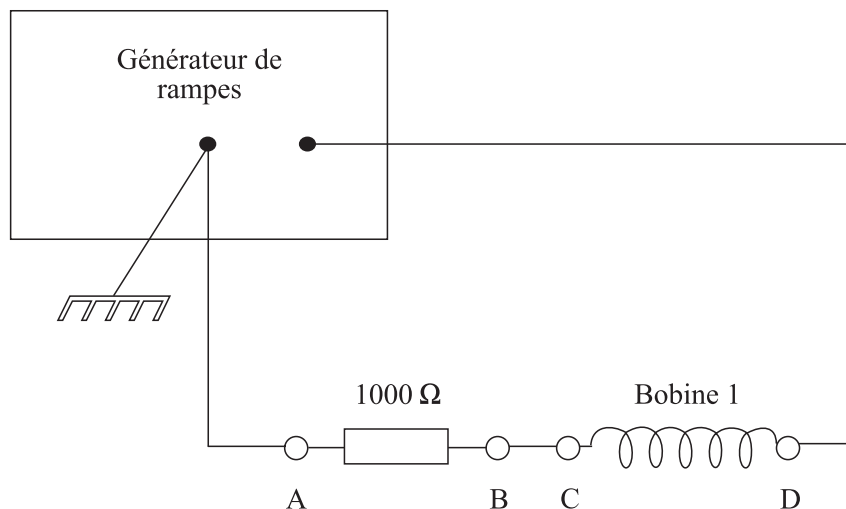
- Une résistance purement ohmique³, de 10 ou 20 k Ω montée sur un socle ET 2301 11201.
- Des fils de connexion.
- Deux câbles de raccord, en fil «coaxial», pour l'oscilloscope ou deux adaptateurs BNC - bananes.

2.2. Montage

2.2.1. Monter d'abord, en série,

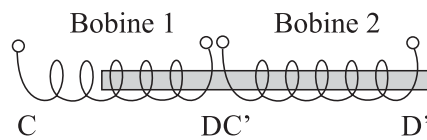
- le générateur de rampes;
- la résistance de $1000\ \Omega$;
- une des bobines de 500 (600) spires.

Remarque: on veillera à commencer le montage par la borne «terre» (la borne noire) du générateur et à amener cette «terre» à l'une des bornes de la résistance de $1000\ \Omega$.



³ Cette résistance est fournie avec l'ensemble ET 2310 11101.

2.2.2. Placer ensuite le noyau ferromagnétique dans la bobine 1, en le laissant dépasser vers la droite (par exemple). Enfiler ensuite la bobine 2 sur le noyau.



Il est commode (voir plus loin § 2.4.1.) d'amener l'une des extrémités du noyau au ras du flanc D' de la bobine 2.

2.2.3. Placer ensuite:

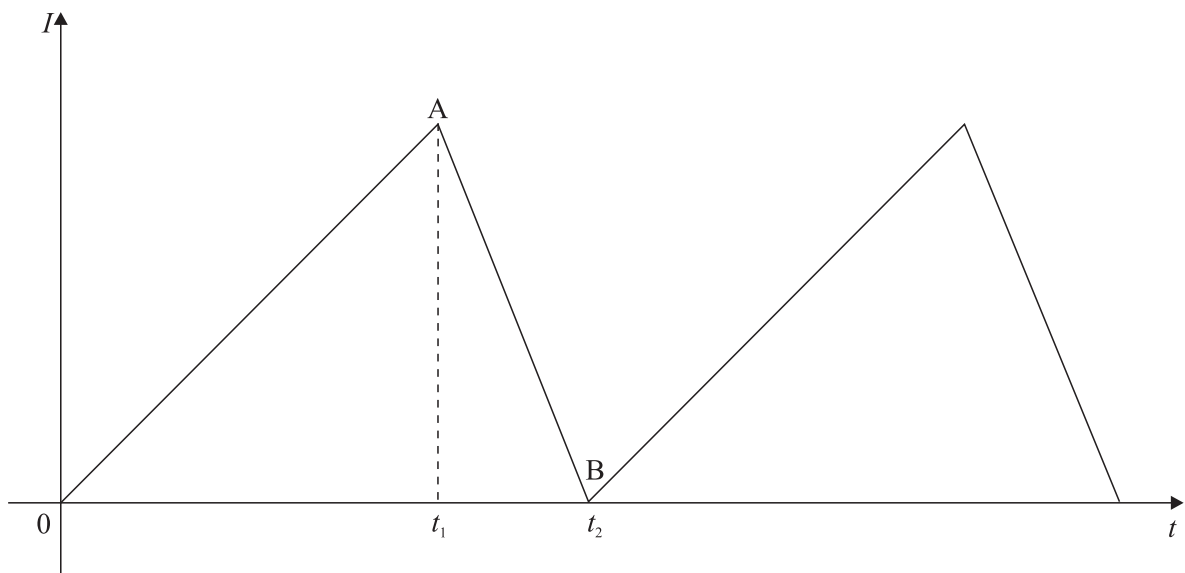
- un des canaux (1) de l'oscilloscope aux bornes A et B de la résistance de $1000\ \Omega$ (respecter la «terre»!);
- l'autre canal (2) de l'oscilloscope aux bornes C' et D' de la bobine 2.

2.3. Exploitation - Étude quantitative du phénomène d'induction électromagnétique

2.3.1. Mise en évidence des éléments qui feront ensuite l'objet de mesures

Réglages de l'oscilloscope

- Le premier canal de l'oscilloscope est relié aux bornes A et B de la résistance de $1000\ \Omega$, purement ohmique. La différence de potentiel aux bornes de cette résistance est en phase avec l'intensité I du courant qui circule dans le circuit décrit en 2.2.1., donc dans la bobine 1, et lui est proportionnelle. On observe, dans un premier temps, que cette intensité I , créée par la différence de potentiel $U_{\text{gén.}}$ décrite en 1. est liée au temps par une relation décrite par le graphe 2 ci-dessous, qui peut être mis en évidence sur le premier canal de l'oscilloscope.



Graphe 2

Remarque:

Les voisinages des «points anguleux» A et B sont en réalité des fragments de courbe de très grande courbure, le passage d'une rampe à l'autre se faisant en un temps extrêmement bref mais non nul. Ce «défaut» est quasiment imperceptible.

- Le second canal de l'oscilloscope est relié aux bornes C' et D' de la bobine 2. La trace qui lui correspond montre donc de quelle manière varie, en fonction du temps, la tension électromotrice E induite aux bornes de la bobine 2.

Comme le courant I qui passe dans la bobine 1 engendre, au travers d'une section droite de cette bobine, un flux d'induction magnétique Φ qui se retrouve à l'intérieur de la bobine 2, on a, E désignant la tension électromotrice engendrée aux bornes de la bobine 2 et K et K' des constantes, les relations bien connues⁴:

$$E = - \frac{d\Phi}{dt} \quad \Phi \approx KI$$

d'où $|E| \approx K' \frac{dI}{dt}$

La tension électromotrice induite aux bornes de la bobine 2 est donc, à peu de chose près, proportionnelle à la dérivée, par rapport à t , de la fonction (I, t) .

Comme, dans le cas présent de variations de I selon des «rampes rectilignes» (sauf pendant les durées, minimales, nécessaires à l'établissement de régimes stationnaires), on a:

- entre l'heure 0 et l'heure t_1 (graphe 2)

$$I \equiv I_1$$

$$I_1 = at \quad (a = \text{C}^{\text{te}})$$

$$\frac{dI_1}{dt} = a = \text{C}^{\text{te}}$$

- entre l'heure t_1 et l'heure t_2

$$I \equiv I_2$$

$$I_2 = bt + c \quad (b \text{ et } c \text{ sont des constantes})$$

$$\frac{dI_2}{dt} = b = \text{C}^{\text{te}}$$

On en tire:

- entre l'heure 0 et l'heure t_1

$$|E_1| = \left| K' \frac{dI_1}{dt} \right| = |K'a| \tag{1}$$

- entre l'heure t_1 et l'heure t_2 ,

$$|E_2| = \left| K' \frac{dI_2}{dt} \right| = |K'b| \tag{2}$$

⁴ I et ΔI étant petits, la perméabilité μ du noyau varie peu.

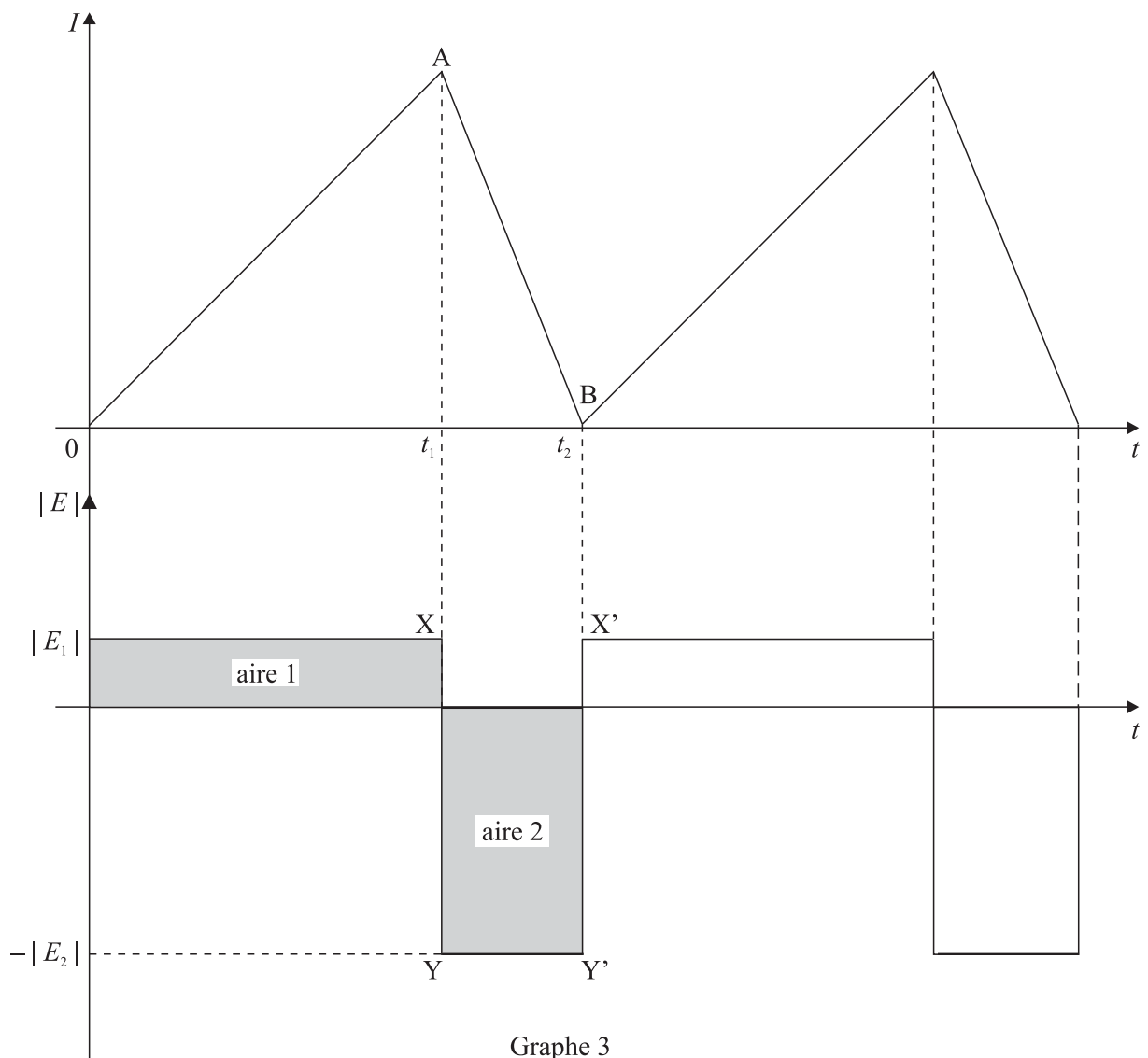
Les tensions électromotrices induites pendant les étapes $0t_1$ et t_1t_2 sont des constantes (dès qu'un régime stationnaire est établi).

De (1) et (2), on tire:

$$\left| \frac{E_1}{E_2} \right| = \left| \frac{a}{b} \right| \quad (3)$$

Le rapport des tensions électromotrices induites pendant les étapes qui correspondent aux rampes montantes et descendantes est égal au rapport des pentes des rampes en question (les droites 0A et AB).

L'oscilloscope, correctement réglé, montrera donc une figure analogue à celle du graphe 3 ci-dessous:



Remarques:

- La rectitude plus ou moins parfaite des segments XY et X'Y' (graphe 3) peut être améliorée en allongeant ou en diminuant la longueur de la portion de noyau ferromagnétique que contient la bobine 1 (la bobine 2 est entièrement occupée par le noyau).

- Les signes des grandeurs E_1 et E_2 , qui ne sont considérées ici qu'en valeur absolue, et donc les positions des aires 1 et 2 (graphe 3) au-dessus ou en dessous de l'axe t sont liés à un certain nombre d'éléments qui sont difficiles à mettre en évidence devant une classe (mode d'enroulement du fil des bobines, positions des fils de l'oscilloscope, etc.). Nous proposons de passer sous silence cet aspect «algébrique» du phénomène d'induction. Celui-ci peut être mis en évidence lors d'expériences qualitatives.

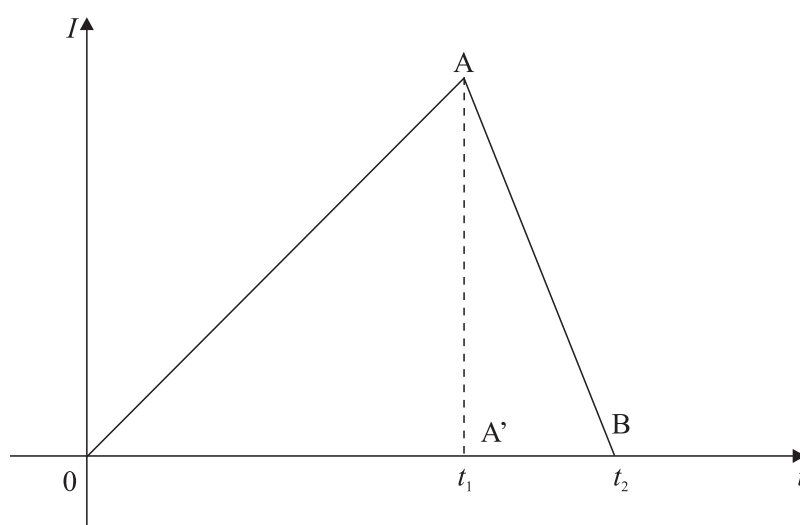
Toutes les opérations précédentes étant faites, on peut alors, dans un premier temps, montrer aisément, sur l'écran de l'oscilloscope:

- que les discontinuités XY et $X'Y'$ du graphe $(|E|, t)$ correspondent exactement aux points anguleux qui marquent les changements de pente qui affectent le graphe (I, t) ; ceci en faisant glisser, au moyen des commandes de l'oscilloscope, l'un des graphes par rapport à l'autre;
- que les plus grandes valeurs des tensions électromotrices induites correspondent aux plus grandes pentes des «rampes» du graphe (I, t) et qu'elles sont donc des fonctions croissantes de ces pentes.

2.3.2. Mesures

Nous ne traiterons qu'un seul exemple, qui correspond à la position 2 du commutateur du générateur de rampes.

2.3.2.1. Détermination du rapport $\left| \frac{a}{b} \right|$ des valeurs absolues des pentes des droites $0A$ et AB .



$$|a| = \left| \frac{A'A}{0A'} \right| \quad |b| = \left| \frac{A'A}{A'B} \right|$$

$$\left| \frac{a}{b} \right| = \frac{\left| \frac{A'A}{0A'} \right|}{\left| \frac{A'A}{A'B} \right|} = \left| \frac{A'B}{0A'} \right|$$

En tenant compte de (3), on a:

$$\left| \frac{E_1}{E_2} \right| = \left| \frac{A'B}{0A'} \right|$$

Ceci démontre l'égalité des aires 1 et 2 du graphe 3.

Exemple: le commutateur du générateur se trouvant dans la position 2, on mesure, sur le graticule de l'oscilloscope:

$$A'B = (1,65 \pm 0,05) \text{ cm}$$

$$OA' = (3,30 \pm 0,05) \text{ cm}$$

On en tire:

$$\left| \frac{a}{b} \right| = (0,50 \pm 0,02)$$

Remarque: il est souhaitable de maximiser la qualité des mesures. On y arrive en ne gardant, sur l'écran de l'oscilloscope, que la trace (I, t) , que l'on agrandit au maximum, et en la disposant de manière à profiter au mieux des graduations portées par le graticule.

2.3.2.2. Détermination du rapport $\left| \frac{E_1}{E_2} \right|$ des valeurs absolues des tensions électromotrices induites dans la bobine 2.

- Amener la trace 2 (E, t) , seule, sur l'écran de l'oscilloscope et l'agrandir au maximum.
- En utilisant la position «ground» du commutateur d'entrée du canal 2 de l'oscilloscope, supprimer l'action, sur la trace 2, de la tension E . La trace 2 se réduit donc à une droite «horizontale».
- Amener cette droite sur l'une des lignes «horizontales» du graticule.
- Rétablir alors l'accès de la tension E au canal 2 de l'oscilloscope. On obtient ainsi un oscillogramme analogue à la partie (E, t) du graphe 3, l'axe t étant «posé» sur l'une des lignes horizontales du graticule.
- Il est alors aisé de mesurer, en s'aidant des graduations du graticule, les longueurs qui correspondent aux tensions E_1 et E_2 .

Dans l'exemple considéré, on trouve:

$$|E_1| = (0,95 \pm 0,05) \times 0,05 \text{ V}$$

$$|E_2| = (1,90 \pm 0,05) \times 0,05 \text{ V}$$

On en tire:

$$\left| \frac{E_1}{E_2} \right| = (0,50 \pm 0,04)$$

2.3.2.3. Si l'on compare alors les valeurs trouvées de:

$$\left| \frac{a}{b} \right| = (0,50 \pm 0,02)$$

et

$$\left| \frac{E_1}{E_2} \right| = (0,50 \pm 0,04)$$

on constate aisément que les deux valeurs trouvées sont compatibles.

2.4. Remarques et autres manipulations possibles

2.4.1. On peut, en ne modifiant aucun autre élément du montage, remplacer, une fois la mesure précédente effectuée, la bobine 2 de n spires par une bobine de n' spires.

On mesure les nouvelles valeurs E'_1 et E'_2 des tensions électromotrices induites.

En principe,

$$\left| \frac{E_1}{E'_1} \right| = \left| \frac{E_2}{E'_2} \right| = \frac{n}{n'}$$

Dans l'exemple traité:

$$\begin{aligned} |E_1| &= (0,95 \pm 0,05) \times 0,05 \text{ V} \\ |E_2| &= (1,90 \pm 0,05) \times 0,05 \text{ V} \\ |E'_1| &= (1,10 \pm 0,05) \times 0,02 \text{ V} \\ |E'_2| &= (2,30 \pm 0,05) \times 0,02 \text{ V} \\ n &= (500 \pm 1) \text{ spires} \\ n' &= (250 \pm 1) \text{ spires} \end{aligned}$$

D'où:

$$\begin{aligned} \left| \frac{E_1}{E'_1} \right| &= (2,2 \pm 0,2) \\ \left| \frac{E_2}{E'_2} \right| &= (2,1 \pm 0,1) \\ \frac{n}{n'} &= (2,00 \pm 0,01) \end{aligned}$$

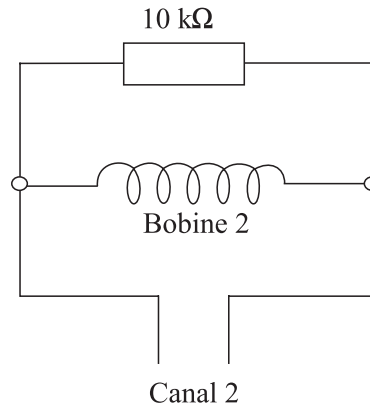
Les trois grandeurs qui font l'objet de la relation (4) sont bien compatibles.

Remarque: avoir soin de ne pas modifier la position du noyau ni dans la bobine 1 ni dans la bobine 2. On y arrive facilement:

- en utilisant des bobines de même géométrie;
- en amenant l'une des extrémités du noyau ferromagnétique au ras du flanc D de la bobine 2.

2.4.2. Les «montants» XY et X'Y' (graphe 3) de l'oscillogramme inférieur ($|E|, t$) sont souvent peu nets.

On peut améliorer leur aspect en plaçant une résistance de 10 ou 20 k Ω en parallèle avec la bobine 2 et en reliant les fils du canal 2 de l'oscilloscope aux bornes de l'ensemble bobine-résistance.



2.4.3. On peut, évidemment, recommencer des mesures analogues pour les positions 1 et 5 du commutateur du générateur (la position 10 ne se prête pas aux mesures, l'une des pentes étant quasiment «verticale»).

On trouve, dans le cas du montage testé:

Position 1:

$$\left| \frac{a}{b} \right| = \frac{2,65}{2,65} = 1$$

$$\left| \frac{E_1}{E_2} \right| = \frac{2,10}{2,10} = 1$$

Position 5:

$$\left| \frac{a}{b} \right| = \frac{0,85}{4,15} = 0,20$$

$$\left| \frac{E_1}{E_2} \right| = \frac{1,40}{6,65} = 0,21$$