

## Quelques expériences d'électromagnétisme

par R. MOREAU, Bordeaux.

---

Ces expériences pourraient servir à illustrer des cours. Elles pourraient également constituer des éléments de manipulations d'élèves.

Elles supposent que l'on dispose d'un matériel assez simple, qu'il est possible de se procurer dans le commerce (en majeure partie), ou que l'on peut fabriquer ou encore récupérer. Les caractéristiques du matériel utilisé seront tout d'abord présentées, puis les expériences elles-mêmes.

Nous illustrerons ainsi de manière très incomplète, certes, mais simple et accessible à des jeunes enfants, les notions de gradateur continu, d'alternateur monophasé et de générateur d'impulsions d'allumage. Les lois physiques qui sous-tendent ces phénomènes sont en général très simples, mais, pour celles qui présentent quelques difficultés d'analyse immédiate, nous donnerons, en fin d'article, quelques explications supplémentaires.

### A) REALISATION D'UN GRADATEUR DE LUMIERE UTILISANT UN INTERRUPTEUR A LAMES SOUPLES.

#### 1° Présentation et analyse du fonctionnement d'un interrupteur à lames souples.

Ces interrupteurs — on les appelle parfois relais Reed ou I.L.S. — sont constitués par deux lames souples placées à l'intérieur d'une ampoule de verre (photographie de la fig. 1). Les collections des collègues en disposent en général, et l'on peut facilement s'en procurer chez des distributeurs de matériel électronique. Ils sont utilisés dans les dispositifs de sécurité, dans les automobiles, etc.

Lorsque l'on place un de ces interrupteurs dans un champ magnétique convenable, (direction locale de  $\vec{B}$  parallèle aux lames de l'I.L.S., norme minimale de  $\vec{B}$  de l'ordre de 1 mT) les lames s'aimantent ; elles s'attirent et entrent en contact (voir le complément n° 1). A ce moment, en prêtant bien l'oreille, on entend un

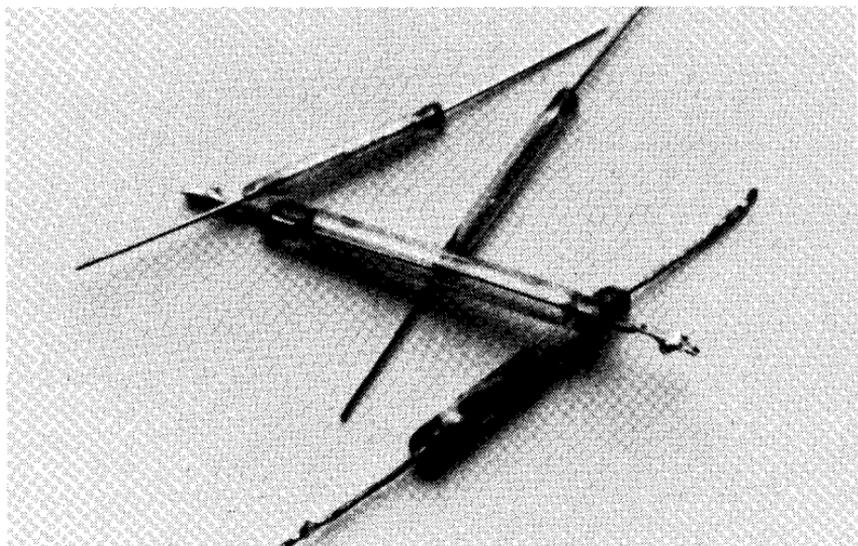


Fig. 1. — Interrupteurs à lames souples d'origines différentes.

petit déclic indiquant que le contact est établi. Cependant, c'est en insérant l'I.L.S. dans un circuit simple tel que celui de la fig. 2 que l'on s'assurera avec certitude du fait que le contact est ou non établi.

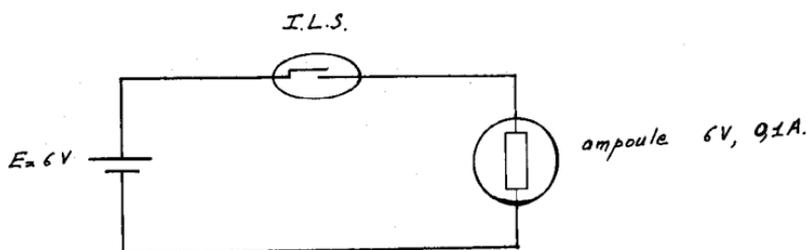


Fig. 2

Nous allons nous intéresser au champ magnétique  $\vec{B}$  qui permet le « collage » des lames, et tout d'abord, à sa direction.

On peut facilement montrer, avec des aimants, que le champ  $\vec{B}$  appliqué à l'I.L.S. doit être, préférentiellement, parallèle aux lames. Un champ parallèle de valeur typique 1 à 2 mT suffit en effet à les faire coller, et pratiquement tous les aimants peuvent fournir de tels champs. Au contraire, lorsque les lignes de champ

magnétique sont perpendiculaires à la direction générale des lames de l'I.L.S., c'est un champ environ 40 fois plus important qui doit être appliqué pour entraîner ce collage. Or très peu d'aimants fournissent des champs magnétiques de l'ordre de 60 mT. On a donc de fortes chances, pour un aimant et un I.L.S. donnés, d'obtenir les résultats schématisés sur la fig. 3.

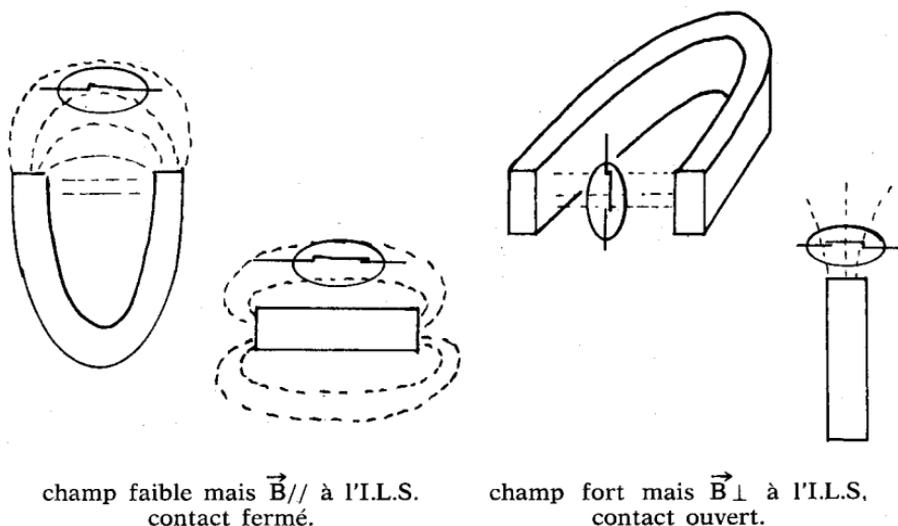


Fig. 3

Ces expériences peuvent être rendues quantitatives en prenant comme source de champ non un aimant, mais une bobine de dimensions assez importantes pour que l'on puisse y disposer l'I.L.S. soit parallèlement à son axe, soit perpendiculairement. On constatera alors que, dans ce dernier cas, l'intensité minimale nécessaire pour provoquer la fermeture du contact de l'interrupteur est environ 40 fois plus importante que dans l'autre où le champ  $\vec{B}$  est parallèle aux lames.

En ce qui concerne la mesure de la norme minimale du champ magnétique  $\vec{B}_m$ , parallèle aux lames, qui assure leur rapprochement, on peut assez facilement la comparer à celle du champ magnétique terrestre  $B_T \simeq 4,7 \cdot 10^{-5}$  T, ou bien la mesurer grâce à un solénoïde de caractéristiques connues.

Dans le premier cas, la forme de la bobine peut être quelconque. Disposons l'I.L.S. parallèlement à l'axe de la bobine, de manière stable. On peut pour cela forer un trou dans un noyau

en bois qu'on enfoncera dans la bobine, et disposer l'I.L.S. dans ce trou où les frottements le maintiendront. Plaçons l'axe commun à la bobine et à l'I.L.S. dans la direction du champ magnétique terrestre  $\vec{B}_T$  (dans le plan du méridien magnétique défini par l'aiguille aimantée, prendre une inclinaison voisine de  $64^\circ$  ; la composante verticale  $\vec{B}_{Tv}$  de  $\vec{B}_T$  étant dirigée vers le sol), selon la fig. 4.

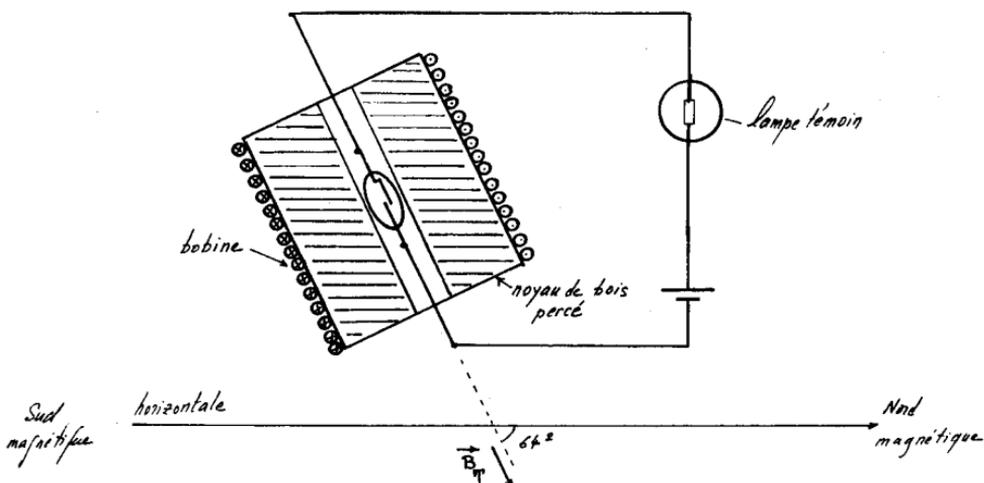


Fig. 4

Le champ magnétique  $\vec{B}_b$  produit par la bobine a donc même direction que  $\vec{B}_T$ , mais selon le sens du courant qui la parcourt, il a même sens que  $\vec{B}_T$ , ou, au contraire, un sens opposé.

Admettons que le contact de l'I.L.S. soit établi pour une valeur  $B_m$  constante du champ magnétique ; cela est vrai si on s'affranchit du phénomène d'hystérésis concernant les lames en ne procédant à une mesure qu'après avoir fait subir à l'interrupteur, à plusieurs reprises (3 ou 4 au moins), le même cycle magnétique : croissance de l'intensité  $i$  dans la bobine de la valeur nulle jusqu'à la valeur permettant la fermeture de l'interrupteur, puis diminution de  $i$  jusqu'à la valeur nulle, etc. Dans le cas de la fig. 4, le champ  $\vec{B}_1$  produit par la bobine a même sens que  $\vec{B}_T$ . Si le contact de l'I.L.S. est établi pour la valeur  $i_1$  de l'intensité parcourant la bobine, on aura :

$$B_m = B_1 + B_T = ki_1 + B_T. \quad (1)$$

En effet  $B_1 = \|\vec{B}_1\|$  est proportionnel à l'intensité  $i_1$  qui parcourt la bobine. En permutant les bornes d'alimentation de la bobine, sans toucher à l'I.L.S. à l'intérieur de la bobine, ni à la bobine elle-même, on crée un champ  $\vec{B}_2$  de sens opposé à  $\vec{B}_T$ .

Si l'intensité minimale permettant la fermeture de l'interrupteur est  $i_2$ , dans ce deuxième cas, on peut écrire :

$$B_m = B_2 - B_T = k i_2 - B_T. \quad (2)$$

En ajoutant les relations (1) et (2), on trouve :

$$2 B_m = k (i_2 + i_1).$$

En les retranchant :  $2 B_T = k (i_2 - i_1)$ .

On a donc :

$$\frac{B_m}{B_T} = \frac{i_1 + i_2}{i_1 - i_2}.$$

Avec une bobine de 1000 spires utilisée dans les lycées, on trouvera par exemple :

$$i_2 = 90 \text{ mA} \quad \text{et} \quad i_1 = 83 \text{ mA}, \quad \text{soit} \quad \frac{B_m}{B_T} \simeq 25.$$

En toute rigueur,  $B_m$  est la valeur du champ magnétique uniforme minimal qu'il faut créer en l'absence de l'I.L.S. pour que celui-ci se ferme. Quand l'I.L.S. est placé dans ce champ, il le modifie profondément.

La valeur de  $\frac{B_m}{B_T}$ , égale ici à 25, dépend évidemment du type d'interrupteur choisi.

Si l'on prend  $B_T = 4,7 \cdot 10^{-5} \text{ T}$ , on trouve, dans le cas envisagé plus haut :  $B_m \simeq 4,7 \cdot 10^{-5} \times 25 = 1,16 \cdot 10^{-3} \text{ T}$ .

#### Remarque :

Dans des bâtiments scolaires en béton armé, la norme de  $\vec{B}_T$ , ainsi que son inclinaison, sont assez sensiblement modifiées ; en général, ces grandeurs sont réduites.

Pour évaluer  $B_m$ , on peut encore confectionner un petit solénoïde en enroulant régulièrement 400 spires de fil fin (de diamètre 2 ou 3/10 de mm), sur une fusette de couturière (cylindre creux, de 50 mm de longueur, environ, et de 9 mm de diamètre extérieur). En plaçant cette bobine dans la direction Est-Ouest, de manière à ce que la mesure de  $B_m$  ne soit pas perturbée

par  $\vec{B}_T$ , on trouvera par exemple qu'il faut une intensité minimale  $i = 120$  mA pour faire « coller » les lames de l'I.L.S. L'application de la formule donnant le champ magnétique créé par un

solénoïde, soit  $B = \mu_0 \frac{N}{l} i$ , avec  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ ,  $N = 400$  et  $l = 50$  mm, donne :  $B_m \simeq 1,2 \cdot 10^{-3}$  T.

## 2° Réalisation d'un gradateur de lumière.

### a) AVEC UN AIMANT TOURNANT.

Les interrupteurs à lames souples ont en général très peu d'inertie. On peut les actionner sans peine plusieurs dizaines de fois par seconde. Par contre leur pouvoir de coupure, bien que variable d'une marque à l'autre, est assez limité. On les détériore rapidement en leur faisant couper fréquemment des courants d'intensités trop importantes, surtout si les circuits dans lesquels ils sont insérés sont inductifs. Ne pas dépasser 0,5 A (c'est la valeur correspondant aux I.L.S. distribués par les magasins de la chaîne Tandy).

Dans le circuit de la fig. 2, plaçons un milliampèremètre en série avec les autres éléments.

Approchons de l'I.L.S. un petit aimant circulaire (voir plus loin comment se procurer facilement ce type d'aimant ainsi que le moteur d'entraînement) dont l'aimantation est schématisée sur la fig. 5.

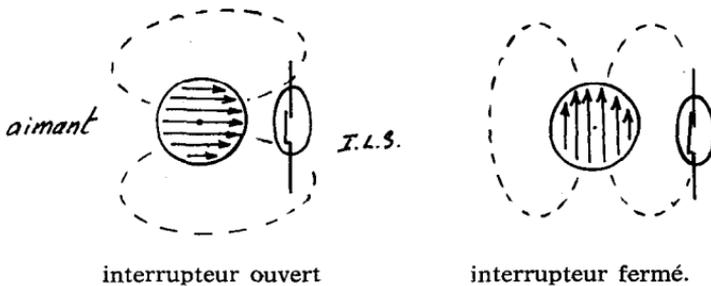


Fig. 5

Lorsque l'on approche le plus possible l'I.L.S. de l'aimant, le champ maximal, perpendiculaire aux lames, qui existe à leur niveau, est de l'ordre de 35 mT, il est insuffisant pour fermer l'interrupteur.

Lorsqu'on fait tourner l'aimant autour de son axe, l'interrupteur est actionné comme l'indique la fig. 5. Si l'aimant est

monté sur un petit moteur alimenté par une pile, le courant qui traverse l'ampoule (fig. 2) est uni-directionnel, mais il est interrompu périodiquement. L'ampèremètre indique la valeur moyenne de son intensité.

On s'aperçoit alors que pour une position donnée de l'aimant (mis en rotation par le moteur), l'intensité moyenne dans le circuit et l'éclat de l'ampoule ne dépendent pas de la vitesse du moteur que l'on peut faire varier du simple au triple en l'alimentant soit par une pile de 1,5 V soit par une pile de 4,5 V.

Par contre, cette intensité moyenne varie quand on fait varier la distance de l'axe de l'aimant à l'I.L.S. (fig. 6).

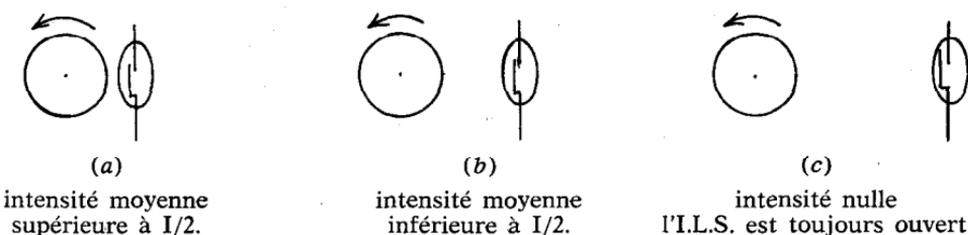


Fig. 6

Si l'on note l'intensité du courant dans le circuit lorsque l'interrupteur est fermé de manière permanente, on mettra facilement en évidence les résultats schématisés sur la fig. 6.

Cela tient au fait que dans le cas de la fig. 6 a, le champ magnétique produit par l'aimant est assez important pour fermer l'interrupteur même lorsque la direction du champ  $\vec{B}$  qu'il produit au niveau de l'I.L.S. n'est pas favorable ( $\vec{B}$ //aux lames). L'interrupteur est donc fermé pendant la majeure partie d'un tour de l'aimant.

Par contre lorsque l'on éloigne l'aimant de l'I.L.S., ce n'est que pour certaines positions de celui-là (fig. 5) que le contact électrique est établi. Cela se produit deux fois par tour, lorsque  $\vec{B}$  est parallèle aux lames.

En éloignant encore l'aimant, le champ n'est jamais assez fort pour aimanter suffisamment les lames de l'I.L.S.

Avec une ampoule de caractéristiques nominales de 6 V, 50 mA, on fait ainsi varier l'intensité moyenne de 40 à 10 mA.

Si la vitesse de rotation du moteur est uniforme, et suffisamment faible pour que l'I.L.S. puisse « suivre » (moins de 6 000 tr/min par exemple), on comprend que l'intensité moyenne dans le circuit de l'ampoule ne dépende pas de cette vitesse, puisque, en effet, les mêmes phénomènes se reproduisent à chaque tour. Ils sont seulement plus ou moins rapprochés et conservent les mêmes rapports de durée.

b) LA SOURCE DE CHAMP MAGNÉTIQUE ALTERNATIF EST MAINTENANT UNE BOBINE.

Le même phénomène (variation de l'intensité moyenne traversant l'ampoule) peut être obtenu de manière différente, et, peut-être, plus simple à analyser. Réalisons le montage de la fig. 6. On a placé l'I.L.S. dans l'une des bobines décrites précédemment. Cette bobine est alimentée par une tension alternative de valeur efficace 6 V. En plaçant en série avec la source et la bobine un potentiomètre bobiné de résistance variable  $R$ , on pourra faire varier l'amplitude de l'intensité alternative qui crée le champ magnétique appliqué à l'I.L.S. (fig. 7).

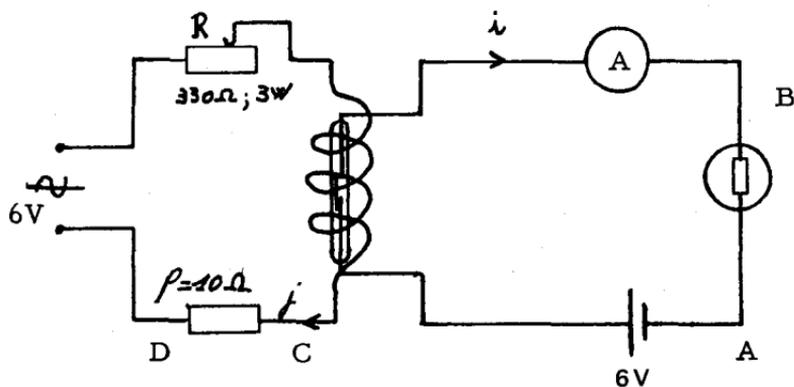


Fig. 7

On peut soit mesurer l'intensité (moyenne ou efficace) grâce à un ampèremètre, soit visualiser  $i(t)$  sur un oscillographe bicourbe en appliquant la tension  $U_{BA} = V_B - V_A$  à la voie 1 de celui-ci (borne A à la masse). C'est ce qui a été réalisé sur les photographies des fig. 8 a, b et c, tandis que l'on appliquait sur la deuxième voie du même oscillographe la tension  $U_{CD} = V_C - V_D$  (borne D à la masse).

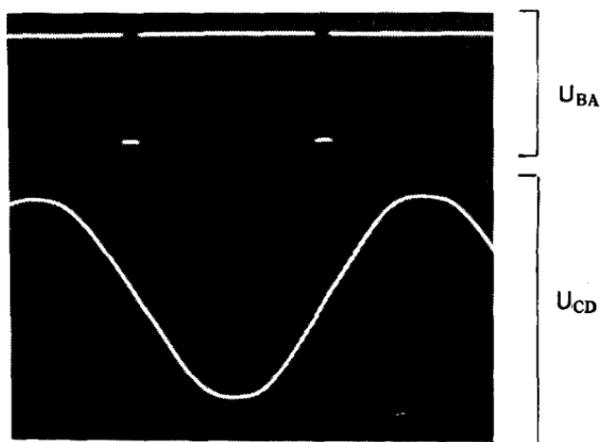


Fig. 8 a

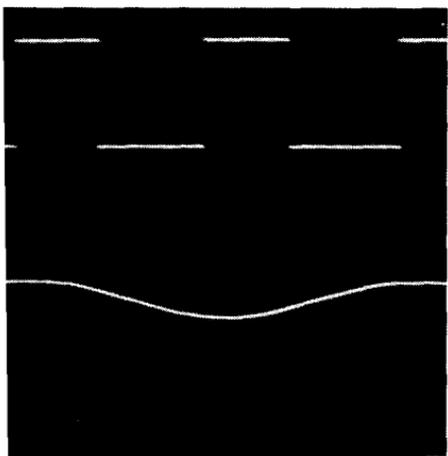


Fig. 8 b

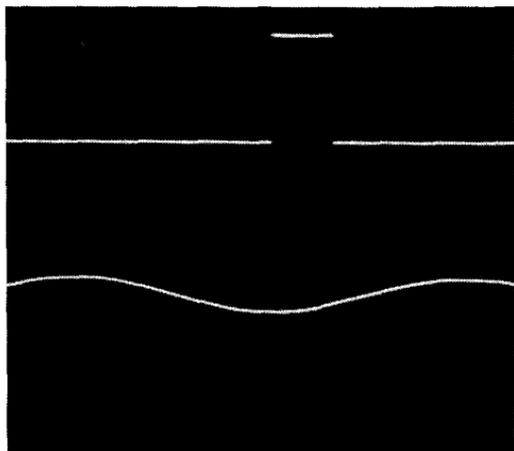


Fig. 8 c

Sur ces photographies, où la courbe du haut représente  $U_{BA}(t)$  et la courbe du bas  $U_{CD}(t) = \rho \cdot j(t)$ , selon les conventions de la fig. 7, on constate que lorsque l'amplitude de  $j(t)$  décroît, l'I.L.S. qui est presque toujours fermé au départ, est de plus en plus longtemps ouvert. Pour une amplitude de  $j(t)$  importante, c'est seulement au voisinage des passages par zéro de cette intensité que l'interrupteur s'ouvre (fig. 8 a). L'intensité moyenne dans l'ampoule est alors très proche de la valeur qu'elle aurait si l'interrupteur était fermé en permanence car la photographie

montre que la tension  $E$  du générateur est appliquée à l'ampoule pendant les 17/18 du temps total.

Pour une amplitude de  $j(t)$  très réduite (fig. 8 b), c'est seulement lorsque  $j(t)$  est voisine de ses extremums que le champ magnétique créé dans la bobine est suffisant pour provoquer une aimantation convenable des lames de l'I.L.S. La photographie montre que l'interrupteur est ouvert pendant plus de la moitié du temps. La tension moyenne aux bornes de la lampe est donc

inférieure à  $\frac{E}{2}$ , et l'éclat de celle-ci diminue beaucoup, comme

l'intensité efficace du courant qui parcourt le filament (voir le complément n° 2).

Lorsque le courant qui parcourt la bobine diminue encore, on constate (fig. 8 c) que l'interrupteur ne se ferme plus que lorsque  $j(t)$  est extrémale dans un certain sens. Cela provient du

fait que le champ magnétique terrestre  $\vec{B}_T$  renforce l'effet du courant d'intensité  $j$  dans ce sens-là, tandis qu'il s'oppose, au moins partiellement, au champ créé par  $j$  lorsque l'intensité a le signe contraire. La même valeur absolue de  $j$  permet donc, avec

le concours de  $\vec{B}_T$  d'aimanter suffisamment les lames de l'I.L.S. pour  $j$  négatif (dans le cas de la fig. 8 c), et ne le permet plus dans le cas où  $j$  est positif. Ce phénomène ne peut se produire si le champ produit par la bobine et appliqué à l'I.L.S. a la direction est-ouest.

La variation de l'intensité lumineuse de l'ampoule placée dans le circuit de la fig. 7 est due, finalement, à la variation du rapport de la durée pendant laquelle l'interrupteur est fermé, pendant une période, à la période elle-même. Ce procédé, qui ne demande, en pratique, qu'une puissance de commande très réduite (les interrupteurs électroniques que sont les transistors ou les thyristors sont commandés par de faibles courants), et qui ne gaspille aucune énergie dans le circuit de puissance symbolisé ici par l'ampoule, (contrairement à ce qui se passerait si on faisait varier l'intensité de l'ampoule en insérant dans son circuit une résistance variable) est très utilisé dans l'industrie (gradateurs en courant alternatif, hâcheurs en courant continu).

## B) PRINCIPE DES ALTERNATEURS MONOPHASES.

Chacun a fait tourner un aimant devant une bobine et a recueilli de ce fait une tension induite. Mais les élèves sont souvent un peu déçus de voir que cette tension n'a pas la forme sinusoïdale de la tension du secteur ou, plus tard, de la plus simple des fonctions périodiques qu'ils connaissent, soit :

$$a \cdot \sin(\omega t + \varphi).$$

Le matériel que nous allons décrire permet d'obtenir des tensions sinusoïdales très pures.

### 1° Aimants bipolaires de forme circulaire, en ferrite « dur ».

La plupart des postes de télévision usagés comportent, à l'arrière du tube, à l'endroit où celui-ci s'effile (col), deux petits aimants en ferrite, plaqués contre le tube par un collier. Ces aimants participent au réglage statique de la focalisation des électrons. Ils sont bipolaires (fig. 5 et 10). La photographie de la fig. 9, où l'on a déposé quelques petites pointes sur l'un de ces aimants, illustre ce caractère bipolaire.

Il s'agit de petits cylindres de 12 mm de hauteur et de 12 mm de diamètre, percés selon leur axe d'un trou de section carrée de 3 mm de côté. Ce trou permet de les fixer facilement sur les axes de petits moteurs. On les y collera pour rendre cette fixation plus sûre.

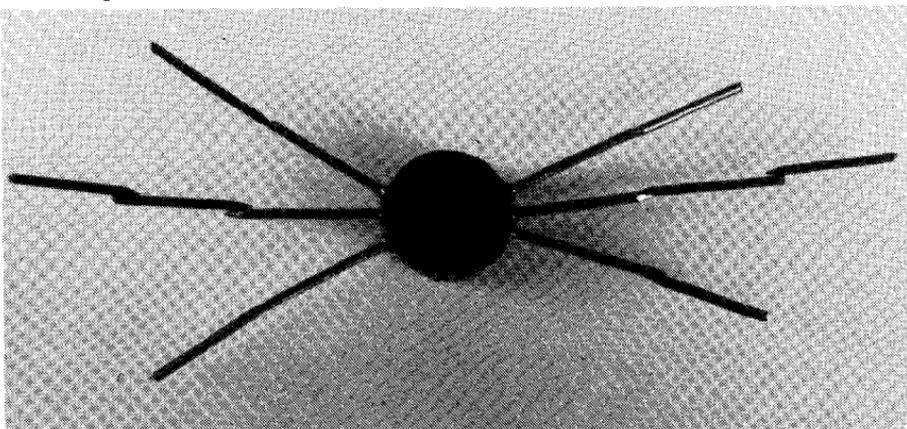


Fig. 9

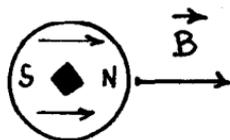


Fig. 10

À 5 mm de leur périphérie, le champ magnétique qu'ils créent, devant un pôle nord ou sud, est supérieur à une dizaine de milliteslas. Etant donné la très grande facilité avec laquelle j'ai pu,

personnellement, me procurer ces aimants (on les enlève très facilement de leur logement, sans se salir), tout comme bon nombre de professeurs de lycée qui ont été intéressés par leur emploi, je n'en ai pas cherché de distributeur. Toutefois des responsables de l'usine ARELEC, B.P. 139 - 64005 Pau Cedex, m'ont assuré qu'ils pouvaient livrer des lots d'aimants de ce type (fer-rite au baryum) à des prix modiques. La Société Aimants UGIMAG, B.P. n° 2 - 38830 Saint-Pierre-d'Allevard, fabrique aussi de tels aimants.

## 2° Petits moteurs à courant continu.

Les moteurs de magnétophones portatifs, de « walkmans », etc. sont alimentés par des piles et doivent fonctionner longtemps. Ils consomment des courants de faibles intensités (de l'ordre de 30 mA). Ce sont des petits moteurs à aimant permanent que l'on peut se procurer dans les magasins d'électronique à des prix très bas. Le moteur qui est représenté sur la fig. 11, muni, en bout d'arbre d'un petit aimant, a été acheté à Bordeaux dans un magasin — ELECTROME, 17, rue Fандаудège — pour cinq francs (dix francs les deux). On peut également en récupérer sur des appareils hors service.

Leur vitesse de rotation est sensiblement proportionnelle à la tension qu'on leur applique.

On trouve également très facilement, dans beaucoup de grands magasins, comme chez de nombreux revendeurs de matériel électronique ou de modèles réduits, des petits moteurs de marque APPLICRAFT (de type M2 par exemple) pour un prix unitaire voisin de 15 francs. Ces moteurs peuvent être fixés sur des supports adaptés.

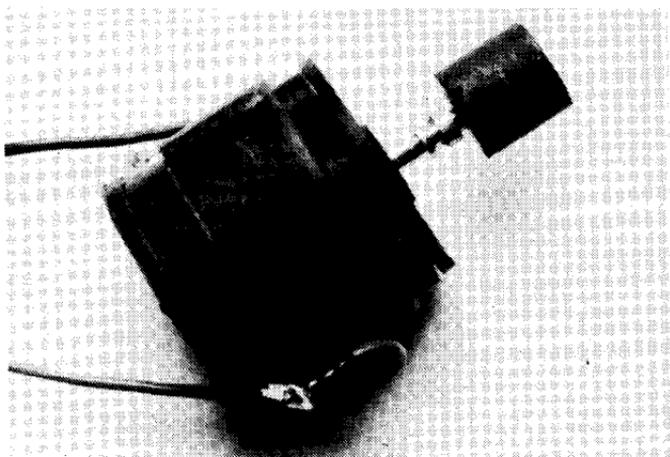


Fig. 11

## 3° Bobine à noyau de fer.

Enrouler, comme il a été dit précédemment, 400 (ou plus) tours de fil de cuivre émaillé de 2 ou 3 dixièmes de mm de diamètre, sur une fusette de couturière. Il s'agit d'un petit tube de matière plastique, bordé à ses extrémités, sur lequel est généralement enroulé le fil à coudre de couleur. A l'intérieur du tube, passer la vis d'un boulon, que l'on choisira légèrement plus longue que la fusette, de manière à y adapter l'écrou correspondant (fig. 12).

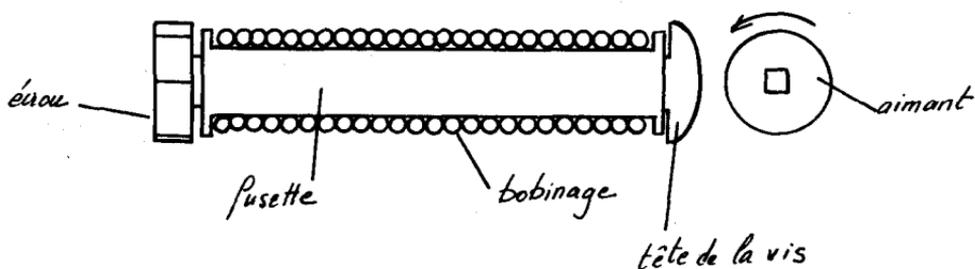


Fig. 12

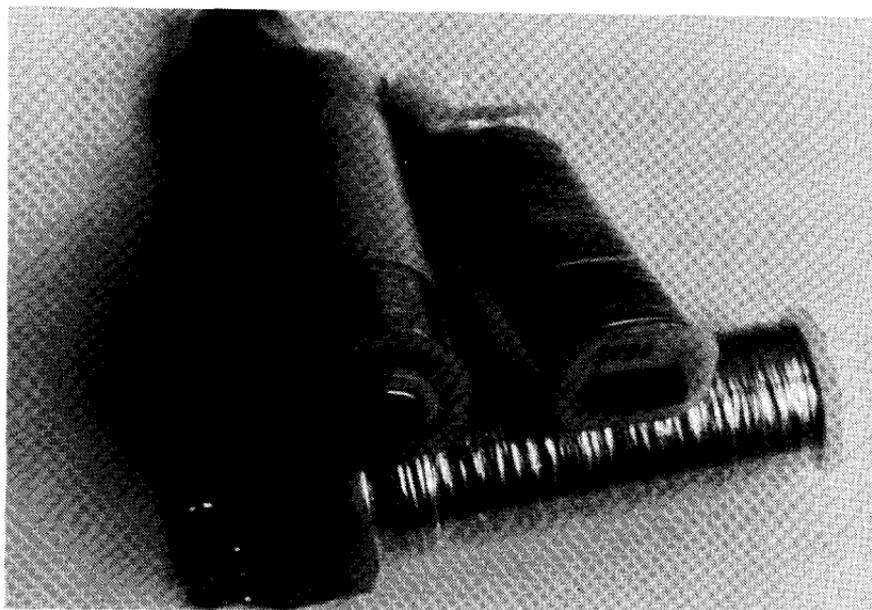


Fig. 13

Pour un même nombre de spires, le fait de disposer le bou- lon comme l'indique la fig. 12 permet de multiplier par 15, envi- ron, le flux maximal embrassé par la bobine.

Signalons encore que depuis quelque temps, on procède à la démolition des anciens centraux téléphoniques à relais, dont la construction était parfois assez récente, pour les remplacer par des postes électroniques. Il est souvent possible, en s'adressant aux techniciens des Télécommunications, de récupérer d'excel- lentes bobines équipant ces anciens centraux. Ne pas oublier de récupérer également leur noyau de fer.

Deux de ces bobines sont photographiées sur la fig. 13. La bobine n° 5954 dont le noyau est réglable, comporte environ 20 000 spires. La bobine n° 5400 dont le noyau est fixe comporte, elle, environ 80 000 spires.

#### 4° Réalisation d'un petit alternateur.

En reliant les bornes de la bobine à celles d'un oscillographe, et en approchant l'une des extrémités de la bobine, munie de son noyau de fer, de l'aimant en rotation, on obtiendra une ten- sion sinusoïdale, dont on pourra déterminer la valeur efficace grâce à un voltmètre et la fréquence grâce à la base de temps de l'oscillographe.

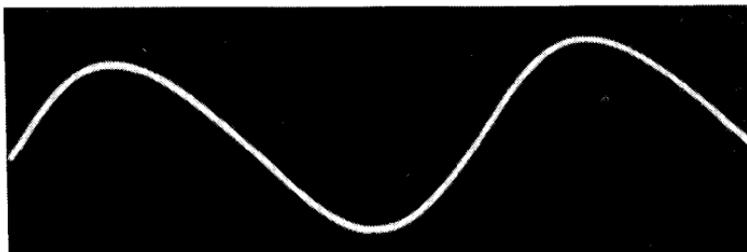


Fig. 14 a

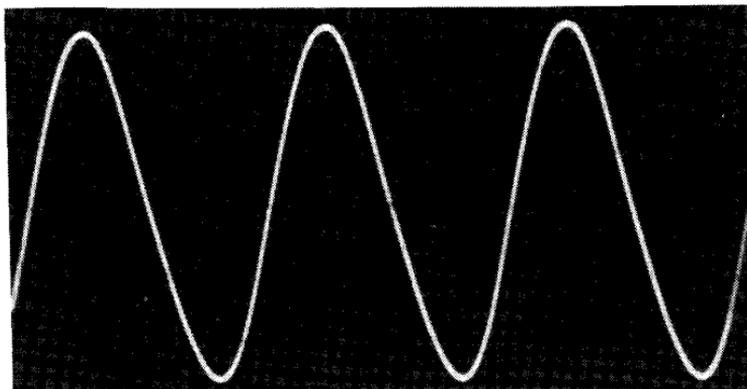


Fig. 14 b

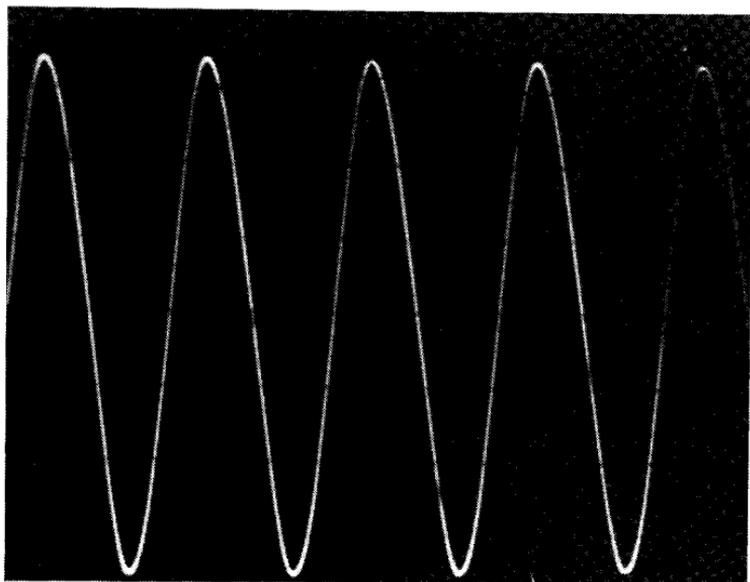


Fig. 14 c

Les trois photographies de la fig. 14 ont été prises avec les mêmes échelles de tensions (verticale) et des temps (horizontale), cependant que la tension d'alimentation du petit moteur portant l'aimant passait de 1,5 V (un élément de pile ordinaire) à 3 V (deux éléments en série) puis enfin à 4,5 V (pile totale).

On constate que la fréquence est multipliée par deux puis par trois (3 arches puis 6 et enfin 9), ainsi que l'amplitude (tout comme la valeur efficace). Un alternateur fournit donc une tension de valeur efficace d'autant plus élevée que sa vitesse de rotation — ou sa fréquence — est plus élevée. Ainsi, à bord des avions, où l'on doit minimiser le poids des dispositifs embarqués, la fréquence du courant alternatif produit par les alternateurs de bord est 400 Hz. Il faudrait des inducteurs plus gros et donc plus lourds (ici c'est l'aimant qui est l'inducteur), et des bobinages plus importants pour obtenir les mêmes tensions efficaces à 50 Hz ou 60 Hz, fréquences qui sont celles des réseaux nationaux (voir complément n° 3).

Donnons quelques ordres de grandeurs : avec la bobine dessinée sur la fig. 12 (400 spires sur une fusette de 5 cm de long), lorsque la vitesse de rotation de l'ensemble moteur-aimant de la fig. 11 est de 4 500 tours par minute (tension d'alimentation voisine de 6 V), on obtient au mieux une tension de valeur efficace

proche de 0,6 V, soit 1,7 V crête à crête. On la visualise cependant très facilement à l'oscillographe.

Pour la même vitesse, mais en utilisant une bobine des P.T.T. n° 5954, on peut obtenir une tension dont la valeur efficace peut atteindre 10 V.

Avec la bobine n° 5400, dans les mêmes conditions, on peut obtenir 100 V.

### C) GENERATEUR DE TENSION D'ALLUMAGE POUR LES MOTEURS A EXPLOSION.

#### 1° L'allumage automobile.

Dans les moteurs à explosion utilisant l'essence comme carburant, la combustion est provoquée par les étincelles dues aux bougies. Ces étincelles sont produites par de hautes tensions (de l'ordre de 20 000 V) qui sont appliquées entre les électrodes des bougies. Dans les allumages classiques, un rupteur interrompt périodiquement le courant parcourant l'enroulement primaire d'un transformateur (la bobine d'allumage) comportant un faible nombre de spires, tandis que la tension obtenue aux bornes de l'enroulement secondaire est effectivement appliquée, successivement, à chacune des bougies. Les bornes du rupteur sont les vis platinées, tandis que la distribution des décharges électriques aux différentes bougies est assurée par un balai rotatif : il s'agit du rotor du « Delco ».

Dans les allumages électroniques, les vis platinées sont remplacées par un interrupteur électronique, un thyristor par exemple, dont l'instant d'allumage peut être calculé par un microprocesseur. Le transformateur à rapport de transformation élevé (bobine) demeure.

Dans l'air, on peut obtenir des étincelles entre les électrodes d'une bougie en lui appliquant une tension comprise entre 2 000 et 3 000 V.

#### 2° Matériel nécessaire aux expériences.

Nous allons montrer qu'on peut obtenir une telle tension à l'aide d'un matériel très simple, comportant essentiellement un petit transformateur 6 V - 220 V que l'on peut se procurer un peu partout. Choisir pour ce transformateur une puissance apparente de 6 V. A. par exemple.

Indiquons une démarche progressive qui permet de mettre en évidence quelques propriétés du transformateur utilisé en courant interrompu. Pour cela, il sera bon de disposer de

deux diodes électroluminescentes et d'une ampoule au néon de tension nominale de l'ordre de 100 V. Ces ampoules sont vendues chez les distributeurs de matériel électronique (à Paris, Radio M.J., 19, rue Claude-Bernard, par exemple, en fournit). Elles se montent sur les mêmes supports que les ampoules ordinaires 6 V, 100 mA. On peut aussi utiliser l'ampoule d'un tournevis « testeur », ou « pique-phase », que l'on trouve facilement en quincaillerie. Il est d'ailleurs possible d'employer le tournevis lui-même qui comprend, outre l'ampoule au néon, de tension nominale généralement située entre 65 et 80 V, une résistance de protection de l'ordre de 1 M $\Omega$ .

Rappelons l'allure de la caractéristique courant - tension d'une ampoule au néon que l'on peut relever point par point en courant continu ou à l'oscillographe en utilisant la tension alternative fournie par un transformateur d'isolement (placer une résistance de protection de 10 k $\Omega$  en série avec l'ampoule au néon, ce qui permettra de relever l'intensité traversant l'ampoule).

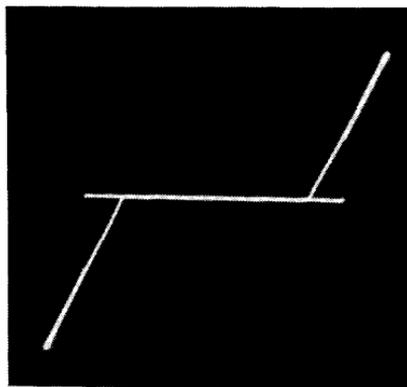
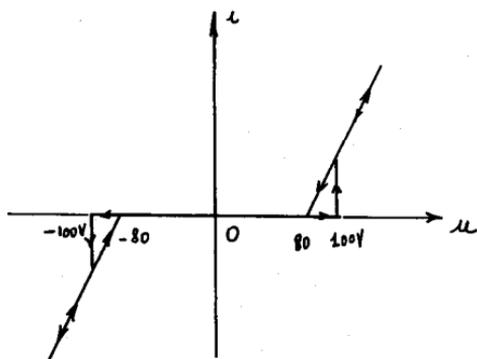


Fig. 15

### 3. Expériences.

a) Réalisons le montage de la fig. 16.

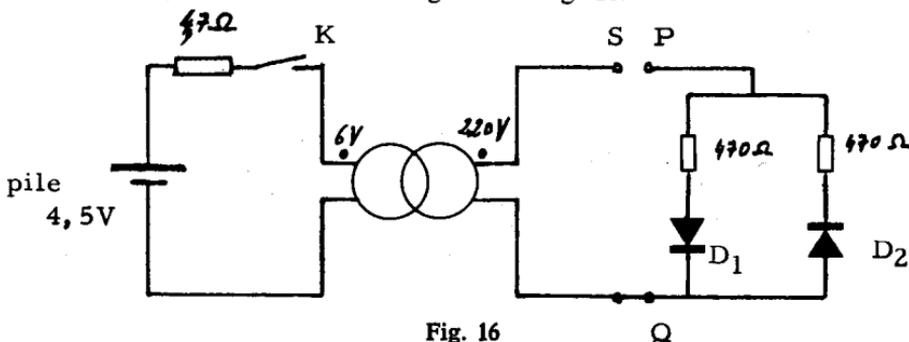


Fig. 16

Les diodes  $D_1$  et  $D_2$  sont des diodes électroluminescentes.

En réunissant les bornes d'une pile aux points P et Q, respectivement, on constate qu'une diode,  $D_1$ , éclaire lorsque le courant circule de P vers Q, tandis que l'autre,  $D_2$ , éclaire lorsque le courant se dirige de Q vers P. Réunir les points S et P.

En manœuvrant l'interrupteur K, on s'aperçoit que l'une des diodes s'allume lorsque l'on ferme K, tandis que l'autre est éclairée lorsque l'on ouvre le circuit primaire.

La tension obtenue au secondaire, fugitive, a une polarité différente selon qu'on établit ou que l'on coupe le courant primaire (voir complément n° 4).

b) Montrons maintenant que les tensions obtenues au circuit secondaire lors de l'ouverture et de la fermeture de K sont toutes deux élevées mais qu'elles ne sont pas égales.

Pour montrer qu'elles sont élevées, il suffit de placer une ampoule au néon qui ne s'allume que pour une tension élevée de 80 V, par exemple, entre les bornes S et Q du montage de la fig. 16 (placer une forte résistance de protection en série avec l'ampoule, ou utiliser directement un tournevis testeur).

Dans les deux cas (ouverture et fermeture de K), cette ampoule s'allume.

Pour montrer qu'elles ne sont pas égales, réalisons le montage de la fig. 17. (Les deux résistances placées entre S et Q, prises ici égales à 22 et 10 k $\Omega$  devront peut-être être modifiées pour que l'expérience de chacun soit concluante).

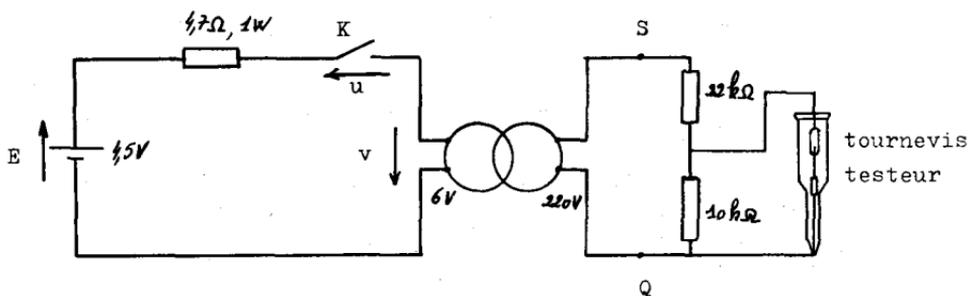


Fig. 17

La tension appliquée au tournevis testeur n'est plus égale qu'au tiers (10/32) de la tension induite au secondaire par les opérations d'établissement et de rupture du courant primaire : à la fermeture du circuit primaire l'ampoule au néon ne s'allume

plus. Par contre à l'ouverture elle s'allume encore. La tension disponible lors de l'ouverture du circuit primaire est beaucoup plus élevée que celle qui est due à l'établissement du courant ; c'est que le courant est coupé par l'ouverture de l'interrupteur K beaucoup plus rapidement qu'il ne peut s'établir lors de la fermeture de K (voir le complément n° 5, deuxième partie).

c) Réalisation d'un montage générateur de très haute tension.

Soit le montage de la fig. 18, dans lequel l'ensemble bobine - I.L.S. remplace le rupteur de l'allumeur d'automobile. La bobine est alimentée par une tension sinusoïdale de 6 V, 50 Hz et l'I.L.S. est donc actionné cent fois par seconde.

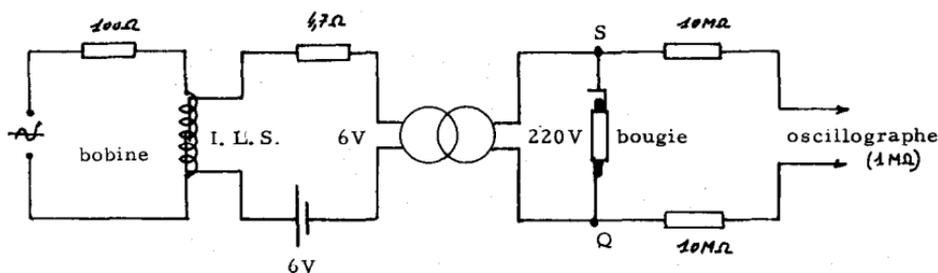


Fig. 18

La tension lue sur l'oscilloscope, de résistance d'entrée généralement égale à  $R_c = 1 \text{ M}\Omega$ , doit être multipliée par 21 pour obtenir la tension réelle, supérieure à 2000 V (photographie de la fig. 19). Si elle est encore trop élevée pour celui-ci, shunter l'oscilloscope par une résistance de  $1 \text{ M}\Omega$ , ce qui divisera encore par deux sa sensibilité.

Sur la fig. 19, on distingue les pointes à la fermeture, négatives, voisines de 200 V, et les pointes à l'ouverture, positives, de l'ordre de 2500 V.

Si on applique la tension  $U_{SQ}$  à une bougie d'automobile, on observe de très belles étincelles entre les deux électrodes. Cela suppose, nous l'avons dit, des pointes de tension supérieures à 2000 V, cette valeur varie évidemment avec l'écartement des électrodes (le régler à une valeur inférieure à 1 mm).

Relier tout d'abord S et Q aux électrodes, puis appliquer la tension alternative à la bobine dans laquelle est placé l'I.L.S.

#### Remarque 1 :

Cette dernière expérience présente un certain danger. Il vaut mieux que seul le maître la réalise. Mais en prenant quelques précautions, elle est facile à monter.

On peut d'ailleurs la réaliser à partir d'une bobine d'allumage réelle, récupérée sur une voiture usagée : les enroulements secondaire et primaire ont un point commun.

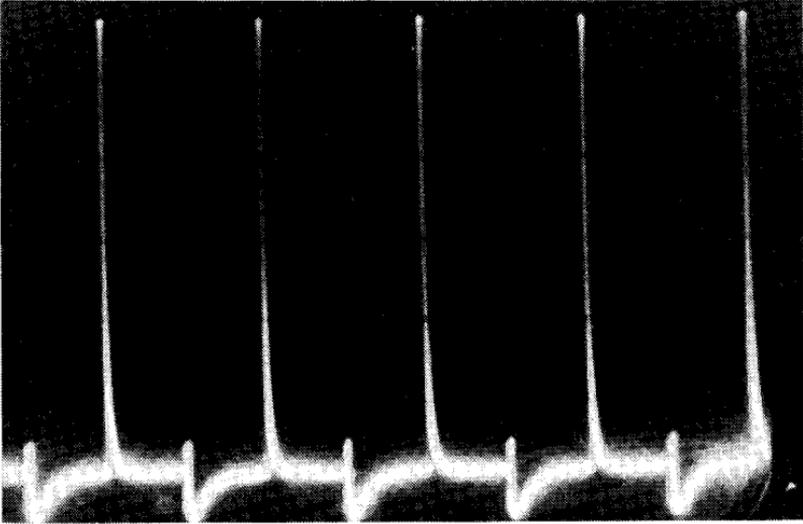


Fig. 19

Pour obtenir l'ouverture périodique d'un contact électrique, on peut, au lieu d'utiliser l'ensemble bobine alimentée en courant alternatif et interrupteur magnétique à lame souple, utiliser un relais monté en fonctionnement instable, comme le montre la fig. 20.

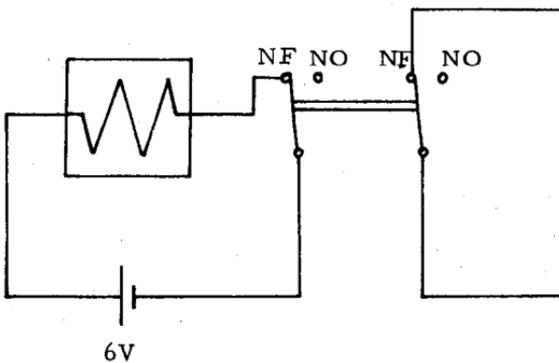


Fig. 20

La bobine est montée en série avec une source de tension convenable et l'un des contacts normalement fermés (NF) qu'elle commande. Ce système est évidemment instable.

En effet, dès que le courant s'établit, la bobine du relais, en attirant l'équipage mobile, rompt le contact NF, ce qui a pour effet de couper le courant d'alimentation de la bobine et l'équipage mobile revient à sa position de repos. Le courant circule à nouveau, etc.

La fréquence du phénomène est réglable par la tension d'alimentation. Suivant les relais, elle peut être comprise entre 30 et 250 Hz. Plus le relais est important, en général, plus son inertie est grande et plus la fréquence est faible.

Notons que le mouvement de l'équipage mobile est limité et que l'amplitude de vibration de la lamelle mobile n'est pas suffisante pour fermer les contacts normalement ouverts. Il faut donc se munir d'un relais disposant au moins de deux contacts NF (on dit aussi contacts repos), l'un est utilisé pour rendre instable le fonctionnement du relais, l'autre joue le rôle de rupteur périodique dans le montage de la fig. 18.

### Complément n° 1

#### AIMANTATION INDUITE DANS DES OBJETS FERROMAGNETIQUES DOUX

Soit un barreau ferromagnétique doux, très allongé, placé dans un champ magnétique qui, avant l'introduction de ce barreau, était uniforme, de valeur  $B_i$ , et d'extension spatiale très supérieure au volume du barreau (fig. 21).

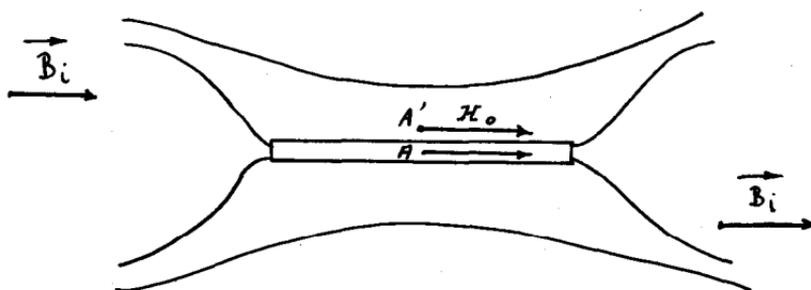


Fig. 21

Au centre du barreau, au point A, les lignes de champ magnétique sont parallèles à l'axe du barreau. Si nous notons  $B_1$  le champ magnétique qui règne au centre du barreau, et  $H_1$  l'excitation magnétique correspondante, on peut écrire :

$$B_1 = \mu H_1 = \mu_0 \mu_r H_1.$$

Soit  $H_0$  l'excitation magnétique à l'extérieur du barreau, au point A' voisin de A. Comme la composante tangentielle de  $\vec{H}$  est continue lors du passage de la surface de séparation de deux milieux, on peut en déduire que les valeurs de  $H_0$  et de  $H_1$  ne sont pas très différentes.  $H_0 \simeq H_1$ . Or en A', le champ magnétique  $B_0$  est relié à  $H_0$  par la relation  $B_0 = \mu_0 H_0$ .

On a donc sensiblement  $B_1 = \mu_r B_0$ .

Certes, le champ  $B_0$  au voisinage du barreau est différent de la valeur uniforme  $B_i$  qu'il avait avant l'introduction de celui-ci. Il est plus faible. Mais  $B_1$  est beaucoup plus important que  $B_i$  car  $\mu_r$  est de l'ordre de  $10^3$ .

Le barreau de fer doux placé dans le champ uniforme  $\vec{B}_i$  qui lui est parallèle s'aimante donc, et si deux barreaux sont placés côte à côte, comme les lames de l'I.L.S., ils s'aimantent tous deux et s'attirent.

Considérons maintenant une plaque circulaire mince placée normalement à  $\vec{B}_i$ . Au centre de la plaque, la symétrie du problème (fig. 22) exige que les lignes de champ magnétique lui soient perpendiculaires. Comme la composante normale de  $\vec{B}$  se

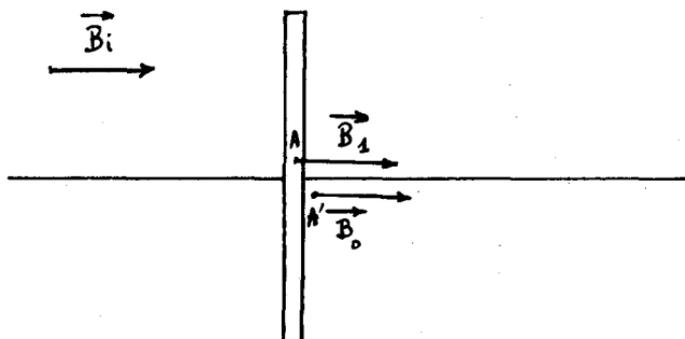


Fig. 22

conserve lors du passage de la surface de séparation de deux milieux différents, on en déduit qu'en deux points A et A' voisins

du centre, situés à l'intérieur de la plaque et l'autre à l'extérieur, les champs magnétiques sont égaux :  $B_1 = B_0$ .

La plaque ne change rien au champ magnétique initial. Donc

$B_1 = B_i$ . Cette plaque mince, placée perpendiculairement à  $\vec{B}_i$ , ne s'aimante donc pas. Il en va de même, dans une moindre mesure, des lames de l'I.L.S. lorsqu'elles sont perpendiculaires au champ  $\vec{B}$ .

### Complément n° 2

#### VALEUR MOYENNE ET EFFICACE DE GRANDEURS INTERROMPUES

Les photographies de la fig. 8 (8 a et 8 b, en particulier), montrent que la tension  $U_{BA}$  aux bornes de l'ampoule a la forme dessinée sur la fig. 23 ci-après :

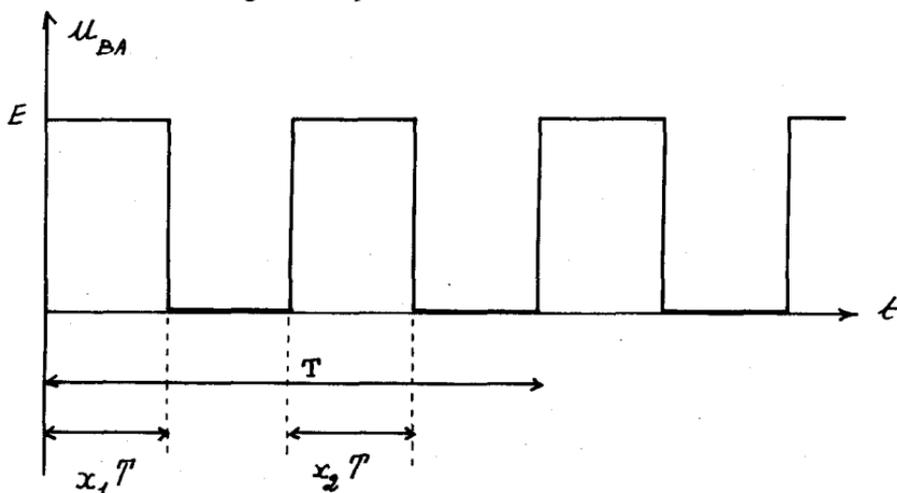


Fig. 23

Si  $T$  désigne la durée d'un tour de moteur, ou une période du courant inducteur, l'interrupteur est fermé pendant les durées  $x_1 T$  et  $x_2 T$  au cours de ce laps de temps. (Nous avons vu que l'influence possible du champ magnétique terrestre peut rendre les coefficients  $x_1$  et  $x_2$  légèrement différents l'un de l'autre, si bien que la période réelle du phénomène est bien  $T$ ).

La valeur moyenne de  $U_{BA}$  est donc égale à  $(x_1 + x_2) E$ , en application de l'expression générale :

$$(U_{BA})_{moyenne} = \frac{1}{T} \int_0^T U_{BA}(t) \cdot dt.$$

L'expression générale de la valeur efficace de cette même tension, soit :

$$(U_{BA})_{efficace} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T U_{BA}^2 \cdot dt},$$

montre que pour obtenir la valeur efficace de  $U_{BA}$ , on doit :

- a) élever  $U_{BA}(t)$  au carré. On obtient soit  $E^2$  soit zéro ;
- b) prendre la valeur moyenne de la grandeur obtenue, soit :  $(x_1 + x_2) E^2$  ;
- c) prendre la racine carrée de cette expression. Donc :

$$(U_{BA})_{efficace} = E \sqrt{(x_1 + x_2)}.$$

Lorsque la valeur de  $(x_1 + x_2)$  passe, comme sur la fig. 8, de 0,94 à 0,46, la valeur efficace de  $U_{BA}$  passe de 0,97 E à 0,68 E. Elle diminue donc moins rapidement que la valeur moyenne. L'intensité efficace diminue encore moins car la température moyenne du filament décroît et sa résistance moyenne décroît également lorsque la tension efficace décroît. Si R est la valeur de cette résistance, on a sensiblement :

$$I_{eff} \simeq \frac{E \sqrt{(x_1 + x_2)}}{R} \quad \text{et} \quad I_{moyen} \simeq \frac{E (x_1 + x_2)}{R}.$$

L'ampèremètre à cadre mobile, utilisé sur la position courant continu, indique bien l'intensité moyenne traversant le filament. Par contre, en position de courant alternatif, il ne donne pas la véritable valeur de l'intensité efficace car sa graduation a été prévue pour du courant sinusoïdal.

Ces indications doivent permettre d'expliquer les divergences apparentes entre des mesures des paramètres  $x$  à l'oscillographe (éventuellement), et des mesures d'intensités.

La fig. 8 et notamment la fig. 8c montrent encore que l'interrupteur reste fermé alors que l'intensité du courant inducteur est inférieure à la valeur qui a permis le rapprochement des lames.

C'est qu'en effet lorsque les lames de l'I.L.S. se touchent, elles n'ont besoin, pour rester en contact, que d'une aimantation inférieure à celle qui les fait s'attirer lorsqu'elles sont éloignées. Le même phénomène est observable pour tous les relais électromagnétiques (courant d'enclenchement supérieur au courant de déclenchement). Si le champ magnétique extérieur minimal pour produire la fermeture de l'I.L.S. est égal à 1,1 mT, par exemple, il suffit d'un champ supérieur à 0,8 mT, en général, pour maintenir cette fermeture.

## Complément n° 3

## CARACTERISTIQUES DE LA TENSION INDUITE DANS UNE BOBINE

Soient  $\varphi(t)$  et  $\Phi_0$ , respectivement, les flux instantané et maximal embrassés par la bobine. Si  $\varphi(t) = \Phi_0 \cdot \cos(\omega t)$ , la force

électromotrice induite  $e(t) = -\frac{d\varphi}{dt}$  vaut  $e = \Phi_0 \cdot \omega \cdot \sin(\omega t)$ .

Si  $E$  désigne la valeur efficace de  $e(t)$ , on a  $E = \frac{\omega \cdot \Phi_0}{\sqrt{2}}$ , et

l'on comprend bien que le fait d'augmenter la pulsation  $\omega$  en augmentant la vitesse de rotation, permet pour une valeur fixée de  $E$ , de diminuer le flux  $\Phi_0$  et donc la taille des machines ( $\Phi_0 \simeq k \cdot N \cdot B_0 \cdot S$ ).

Si, à ce point de vue, les fréquences des réseaux nationaux sont finalement assez faibles, c'est que l'électricité est transportée, sous la forme alternative, sur de longues distances, par des lignes fortement chargées où l'effet inductif prédomine. La chute de tension en ligne, proportionnelle à  $L \omega I$  où  $L$  serait l'inductance de la ligne, varie donc comme la pulsation  $\omega$ . Celle-ci ne peut donc être trop élevée.

En ce qui concerne notre expérience proprement dite, prenons le cas de la bobine des P.T.T. n° 5954 construite autour d'un noyau de fer de section  $S = 4 \text{ mm} \times 12 \text{ mm} = 4,8 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$ .

Le champ magnétique maximal  $B_0$  que l'on peut obtenir au voisinage de l'aimant, dans le noyau de fer de la bobine (renforcé par la présence très proche de ce noyau de fer), est de l'ordre de 70 mT.

Il y a environ  $N = 20\,000$  spires ; mais toutes ne sont pas traversées par le même flux. En effet, le fer, tout d'abord, ne canalise qu'imparfaitement les lignes de champ qui, de toute manière, doivent se refermer et donc retourner vers le pôle opposé de l'aimant. Ensuite les courants de Foucault qui se développent dans ce noyau massif font quelque peu écran aux variations de flux qui pourraient affecter les spires les plus éloignées de l'aimant.

Pour tenir compte de ces deux phénomènes, qu'on peut parfaitement mesurer à l'aide d'un fluxmètre électronique, nous exprimerons le flux maximal  $\Phi_0$  en faisant intervenir un coefficient de bobinage,  $k$ , que nous prenons égal à 0,45 :

$$\Phi_0 = k \cdot N \cdot S \cdot B_0 = 3,0 \cdot 10^{-2} \text{ Wb.}$$

Compte tenu de la valeur de la pulsation choisie, correspondant à  $n = 4\,500$  tr/min, ( $\omega = \frac{2\pi n}{60} = 471$  rad/s), on trouve bien  $E_{max} = 10,0$  V ; pour les autres bobines, les mêmes approximations conduisent à des résultats compatibles avec l'expérience.

### Complément n° 4

## INDUCTION ELECTROMAGNETIQUE

### 1° Polarité des tensions induites.

Lorsque l'on ferme l'interrupteur K du circuit primaire du transformateur représenté sur la fig. 16, un courant induit circule également dans le circuit secondaire ; son effet s'oppose à celui du courant primaire. De même, si l'on ouvre K, le courant induit qui circule au secondaire a pour effet de « prolonger » celui du courant primaire qui existait avant l'ouverture du circuit.

Cette propriété est mise à profit pour repérer rapidement les bornes homologues d'un transformateur (fig. 24).

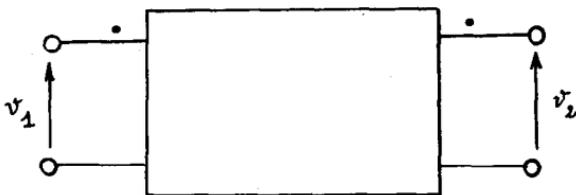


Fig. 24

Sur les schémas électriques, ces bornes appartenant l'une au circuit primaire, l'autre au circuit secondaire, sont repérées par un point. Elles sont telles que si les courants primaire et secondaire pénètrent chacun dans leurs circuits respectifs par ces bornes, leurs effets magnétiques s'additionnent : ils produisent des champs magnétiques de même sens dans le fer.

Imaginons que lorsque l'on ouvre l'interrupteur K (fig. 16), ce soit la diode  $D_2$  qui conduise. Cela signifie qu'un courant pénétrant dans le circuit secondaire par la borne S a même effet (puisque dans ce cas précis il s'oppose à sa disparition) qu'un courant pénétrant dans le circuit primaire par la borne reliée à K. D'où les bornes homologues marquées d'un point sur la fig. 16.

L'intérêt du repérage des bornes homologues réside dans le fait que les tensions homologues ainsi définies,  $v_1$  et  $v_2$  (fig. 24), sont en phase, en régime sinusoïdal.

## 2° Calcul des courants et tensions mis en jeu.

### a) A LA FERMETURE DU CIRCUIT PRIMAIRE.

Soit  $L$  l'inductance de l'enroulement primaire, considérée comme constante. On suppose donc que le circuit magnétique ne se sature pas. Soit  $R$  la résistance du circuit électrique primaire de la fig. 17. Cette résistance comprend, outre la résistance de protection de  $4,7 \Omega$ , celle de la pile et celle de l'enroulement primaire du transformateur. Elle est proche de  $6 \Omega$ .

A la fermeture de l'interrupteur  $K$ , on peut écrire, si  $E$  est la f.é.m. de la pile :

$$E = Ri + L \frac{di}{dt}.$$

Puisque l'intensité initiale est nulle et ne peut subir de discontinuité, la f.é.m.  $L \frac{di}{dt}$ , à l'instant initial, est égale à  $E$ .

C'est cette f.é.m. qui est amplifiée par le rapport de transformation du transformateur, si bien qu'au secondaire, lors de la fermeture de  $K$ , la tension produite possède une valeur absolue

égale à  $mE$ . Si  $E = 6 \text{ V}$  et  $m = \frac{220}{6}$ , la valeur initiale de la tension secondaire est égale à  $220 \text{ V}$ .

Dans le cas de la fig. 17 ( $E = 4,5 \text{ V}$ ), seule la fraction  $\frac{10}{10 + 22} \approx \frac{1}{3}$  de cette tension  $mE$ , soit  $52 \text{ V}$  environ, est appliquée au tournevis testeur dont l'ampoule ne s'allume donc pas.

Après l'instant initial, l'intensité  $i$  croît jusqu'à sa valeur maximale  $\frac{E}{R}$ , mais le terme  $L \frac{di}{dt}$ , égal à  $E - Ri$ , décroît de la valeur  $E$  jusqu'au zéro en une durée qu'on fixe arbitrairement à 3 fois la constante de temps  $\frac{L}{R}$  du circuit.

L'inductance du transformateur que nous avons utilisé est égale à 6 mH. La constante de temps  $\frac{L}{R}$  est donc proche de

1 ms, et on observe bien, sur la photographie de la fig. 19, où la période du phénomène étudié est de 10 ms, que les alternances négatives de la tension secondaire, correspondant à la fermeture du circuit primaire, s'atténuent en 3 ms environ.

La photographie de la fig. 25 représente à la fois la tension secondaire (courbe du haut) et la variation de l'intensité du courant primaire (courbe du bas), selon la loi  $\frac{E}{R} (1 - e^{-R/L \cdot t})$ .

**Remarque :**

Dans l'expérience que nous proposons, si l'on utilise le montage de la fig. 18, il peut arriver, selon le transformateur 6-220 V que l'on utilisera, que l'inductance de l'enroulement primaire soit trop importante pour que l'intensité du circuit primaire

puisse parvenir à sa valeur maximale  $\frac{E}{R}$  pendant la durée de fermeture d'un cycle d'allumage (10 ms).

On peut doubler la durée de celui-ci en plaçant une diode en série avec la bobine qui crée le champ magnétique nécessaire au fonctionnement de l'I.L.S. De cette manière, celui-ci ne se ferme qu'une fois par période du secteur, soit 20 ms.

C'est d'ailleurs pour limiter la valeur de la constante de temps  $\frac{L}{R}$  que les bobines d'allumage des voitures automobiles sont, en général, construites autour d'un noyau magnétique constituant un circuit magnétique ouvert. Ceci limite en effet l'inductance L.

Pour fixer les idées, nous pouvons effectuer un calcul rapide d'ordre de grandeur :

Soit un moteur à 4 temps, classique, comportant 4 cylindres. Pour deux tours du moteur (ou du vilebrequin), il faut générer 4 étincelles, soit 2 étincelles par tour.

On considère généralement que l'intensité du courant primaire doit, à chaque cycle d'allumage, atteindre sa valeur maximale  $\frac{E}{R}$ , tant que la vitesse de rotation du moteur reste infé-

rieure à la valeur de 6 000 tr/min. La durée entre deux étincelles est alors de 5 ms, c'est la durée d'un cycle d'allumage correspondant à la vitesse. Si le circuit primaire est fermé pendant 60 % de la durée de ce cycle, il faut que le courant primaire puisse s'établir en 3 ms.

L'intensité maximale  $\frac{E}{R}$  est proche de 3 A, ce qui suppose une résistance R égale à 4  $\Omega$ .

On doit donc avoir  $3 \frac{L}{R} = 3$  ms, et donc  $L = 4$  mH.

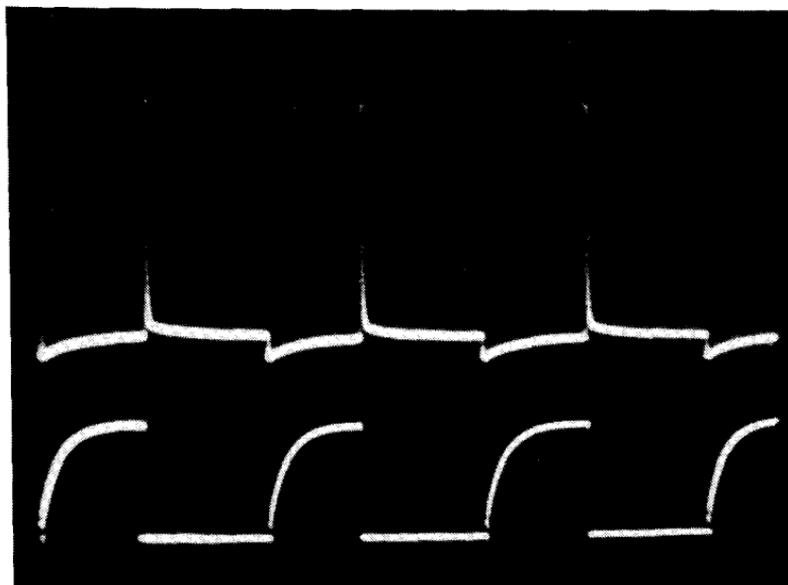


Fig. 25

b) A L'OUVERTURE DU CIRCUIT PRIMAIRE.

Lors de l'ouverture du circuit primaire, les phénomènes qui limitent la décroissance de l'intensité  $i(t)$  sont essentiellement de nature capacitive : l'enroulement primaire possède une capacité répartie  $\Gamma$  qui, de toute manière, limite le taux de variation de la tension aux bornes de l'enroulement primaire. Ainsi pour le transformateur que nous avons utilisé, la bobine formée par l'enroulement primaire, résonne, seule, à 16 kHz (fig. 26). Comme son inductance vaut 6 mH, on en déduit que sa capacité répartie, dans la mesure où l'on peut assimiler le circuit à élé-

ments répartis qu'est la bobine, à un circuit à constantes localisées, vaut 16 nF.

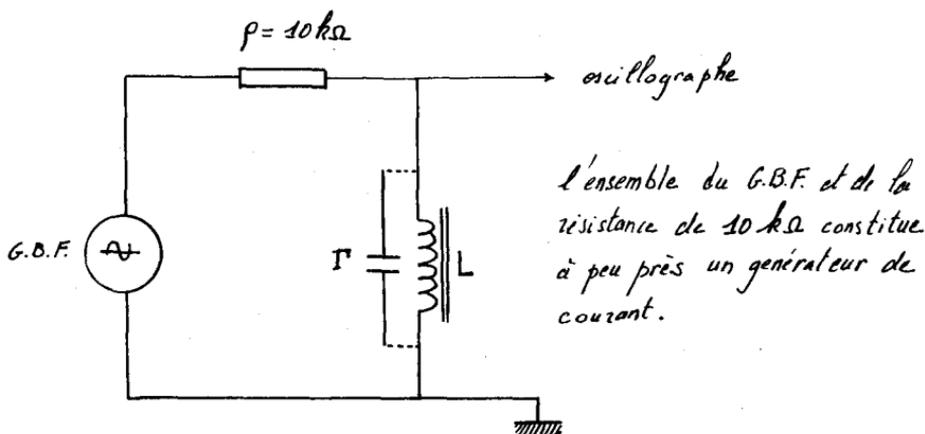


Fig. 26. — Mesure de la capacité répartie  $\Gamma$ .

Ainsi, lorsqu'on ouvre le circuit primaire, la tension aux bornes de la bobine, qui, à la chute ohmique près, était nulle, ne peut prendre sa valeur maximale qu'après une durée approximativement égale au quart de la période propre,  $T_0 = 2\pi\sqrt{L\Gamma}$ , du circuit bouchon formé par la bobine primaire et sa capacité répartie  $\Gamma$ .

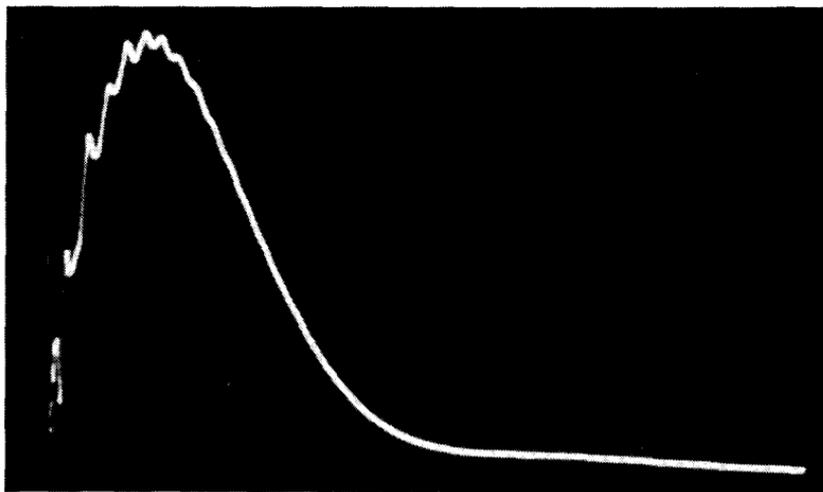


Fig. 27

Avec les valeurs numériques que nous avons données,

$$\frac{T_0}{4} = 15 \mu\text{s}.$$

La fig. 27 donne le détail de l'une des impulsions positives de la fig. 19. Cet oscillogramme permet une mesure aisée du temps de montée d'une impulsion positive, et l'on trouve bien, en effet, 15  $\mu\text{s}$ .

S'il n'y avait pas de pertes dans la bobine — ni d'étincelle aux bornes de l'interrupteur K — toute l'énergie qui, avant l'ouverture du circuit primaire, est condensée sous forme magnétique

( $\frac{1}{2} L I^2$ ), se retrouverait, après une durée approximativement égale à  $\frac{T_0}{4}$ , sous forme électrostatique ( $\frac{1}{2} \Gamma V_m^2$ ).

La tension maximale obtenue au primaire, après la rupture du courant d'intensité  $I = \frac{E}{R}$  vaudrait donc :

$$V_m = \sqrt{\frac{L}{\Gamma} \cdot \left(\frac{E}{R}\right)^2}.$$

Certes, à cause des nombreuses pertes, la tension réellement obtenue est beaucoup plus faible, mais  $V_m$  varie bien, en fonction des divers paramètres  $E$ ,  $R$ ,  $L$  et  $\Gamma$ , comme le montre l'expression précédente (ensuite, le transformateur a pour effet de multiplier par  $m$ , rapport de transformation, la tension obtenue au primaire).

Disons un mot des pertes qui réduisent la tension  $V_m$  par rapport à l'expression théorique  $V_m = \sqrt{\frac{L}{\Gamma} \cdot \left(\frac{E}{R}\right)^2}$ .

Dans le transformateur commun que nous avons utilisé, la cause essentielle des pertes est provoquée par l'apparition de courants de Foucault dans les tôles du circuit magnétique sous l'effet de la variation très rapide du flux. On peut les réduire en utilisant un circuit magnétique de ferrite ou, comme dans les bobines d'allumage des automobiles, en ouvrant le circuit magnétique, ce qui a pour effet de diminuer beaucoup le champ magnétique.

Il y a, en plus, les pertes par effet Joule et les pertes dans les isolants interspires (le champ électrique provoqué par le phé-

nomène d'auto-induction est bien supérieur à celui qui a été prévu pour le fonctionnement normal du transformateur).

De plus, un autre phénomène limite la valeur de  $V_{max}$ , et celui-ci ne dépend que de l'interrupteur.

Pour s'éloigner l'un de l'autre, les deux languets de l'interrupteur ont besoin d'une centaine de microsecondes (un interrupteur classique de pouvoir de coupure 0,5 A, rebondit en 1 ms environ).

Or, la tension aux bornes de la bobine atteint sa valeur maximale en une dizaine de microsecondes, et la fig. 17 nous montre que la relation entre la tension  $u$  aux bornes de l'interrupteur et la tension  $v$  aux bornes de l'enroulement primaire est de la forme :

$$u = v + E.$$

Autrement dit, la tension  $u$  croît très vite (comme  $v$ ), alors que les deux languets ne sont encore éloignés l'un de l'autre que d'une distance de l'ordre du centième de millimètre.

Le champ électrique entre ces deux languets est donc, en général, suffisant pour amorcer un arc par ionisation des atomes du gaz environnant. La création de cette étincelle est source de déperdition d'énergie et de détérioration des grains de contact du rupteur. Dans les allumages mécaniques classiques, ceux-ci sont généralement en tungstène, moins onéreux que le platine et dont le point de fusion est bien plus élevé.

Finalement, alors que les durées caractéristiques de l'évolution du courant dans la bobine primaire, lors de la fermeture et de l'ouverture du circuit, sont dans un rapport 100 environ (1 ms à la fermeture contre 10  $\mu$ s à l'ouverture), les tensions induites, elles, sont dans un rapport (inversé) beaucoup plus faible (de 10 à 30 environ).

#### Remarque :

S'il est difficile de prévoir la tension induite à l'ouverture du circuit, c'est que l'intensité  $i(t)$  varie très rapidement à cette occasion et, de ce fait, fait intervenir des paramètres mal définis tels que la capacité répartie  $\Gamma$ , des pertes d'énergie difficilement prévisibles, etc.

Il est possible de modifier le circuit primaire pour contrôler suffisamment les phénomènes essentiels à l'aide de paramètres très bien définis. Nous allons, pour terminer cette étude complémentaire, étudier la manière dont les constructeurs d'allumages classiques d'automobiles résolvent unanimement le problème de la suppression de l'étincelle de rupture par la mise en

parallèle d'un condensateur de capacité  $C$ , généralement comprise entre  $0,22$  et  $0,47 \mu\text{F}$ , avec l'interrupteur  $K$  du rupteur qu'il protège.

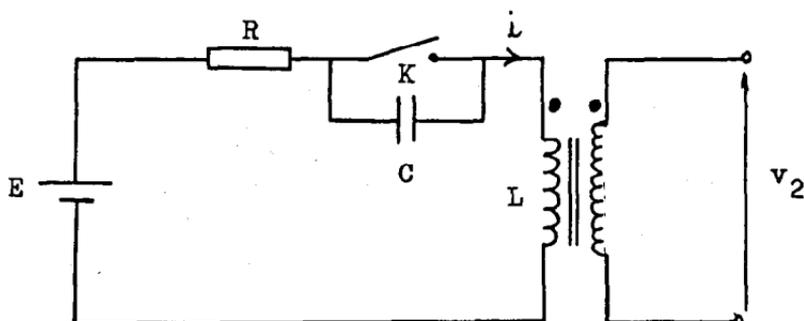


Fig. 28

La fig. 28 montre en effet qu'à l'instant où l'on ouvre l'interrupteur  $K$  l'intensité  $i$  doit normalement avoir la valeur

$$i_0 = \frac{E}{R} \text{ correspondant au régime permanent.}$$

A cet instant, le condensateur est déchargé et la tension à ses bornes évolue selon une loi dont la recherche devrait, normalement, faire les délices d'un élève de classe préparatoire.

Il s'agit de résoudre l'équation différentielle suivante, où  $q$  est la charge de la plaque de gauche du condensateur (fig. 28).

$$L \frac{d^2q}{dt^2} + R \frac{dq}{dt} + \frac{q}{C} = E,$$

avec les conditions initiales suivantes :

$$q(0) = 0; \quad \frac{dq}{dt}(0) = i_0 = \frac{E}{R}.$$

En fait, avec les valeurs numériques couramment rencontrées en électricité automobile, la tension aux bornes de  $C$  devient beaucoup plus importante que la f.é.m.  $E$  de la batterie, si bien qu'on peut, en première approximation négliger  $E$ . Dans ces conditions, au moment où l'intensité  $i$  s'annule pour la première fois après l'ouverture de  $K$ , les tensions aux bornes du condensateur d'une part et du primaire de la bobine d'autre part, sont égales en valeur absolue. Soit  $V_m$  cette valeur commune.

En électricité automobile, le rapport de transformation de la « bobine » d'allumage est proche de 80. Pour obtenir une

tension secondaire maximale de l'ordre de 20 000 V, il faut que la tension primaire maximale,  $V_m$  soit de l'ordre de 300 V (donc bien supérieure à E).

Ecrivons, pour déterminer la valeur approximative de C que l'énergie magnétique  $\frac{1}{2} L i_0^2$  se retrouve, un quart de période propre plus tard, sous forme électrostatique  $\frac{1}{2} C V_m^2$ . Ce faisant, nous négligeons les pertes, ce qui nous conduit à surévaluer C.

Prenons les valeurs numériques précédemment employées :

$$L = 4 \text{ mH}; \quad i_0 = 3 \text{ A}; \quad V_m = 300 \text{ V}.$$

Elles nous conduisent à la valeur de  $C = 0,4 \text{ } \mu\text{F}$ , tout à fait plausible.

Cette valeur nous permet de calculer la durée mise par la tension primaire pour passer de zéro à  $V_m \approx 300 \text{ V}$ .

Cette durée vaut approximativement  $\frac{\pi}{2} \sqrt{LC}$  soit, avec les

valeurs numériques typiques que nous avons déjà utilisées ( $L = 4 \text{ mH}$ ;  $C = 0,4 \text{ } \mu\text{F}$ ), environ  $63 \text{ } \mu\text{s}$ .

Il s'agit d'une durée plus importante que lorsque seule la capacité répartie  $\Gamma$  de la bobine primaire limite la rapidité du phénomène, et, par conséquent, lorsque le condensateur C (fig. 28) est placé en parallèle sur le rupteur, on peut négliger l'influence de  $\Gamma$ .

Avec le transformateur utilisé pour relever les oscillogrammes des fig. 19 et 27 (et pour produire des étincelles entre les électrodes d'une bougie!) — petit transformateur 6-220 V très bon marché — on a obtenu, en plaçant un condensateur de capacité  $2 \text{ } \mu\text{F}$  aux bornes de l'I.L.S. jouant le rôle de rupteur (fig. 18), l'oscillogramme de la fig. 29.

Cet oscillogramme montre que l'amplitude de la tension secondaire est nettement réduite par la présence de C, lors de l'ouverture du circuit primaire (elle est bien entendu inchangée lors de sa fermeture puisque C est mis en court-circuit par l'I.L.S.).

La tension maximale obtenue au secondaire, de l'ordre de 1 200 V, n'est plus suffisante pour obtenir des étincelles entre les

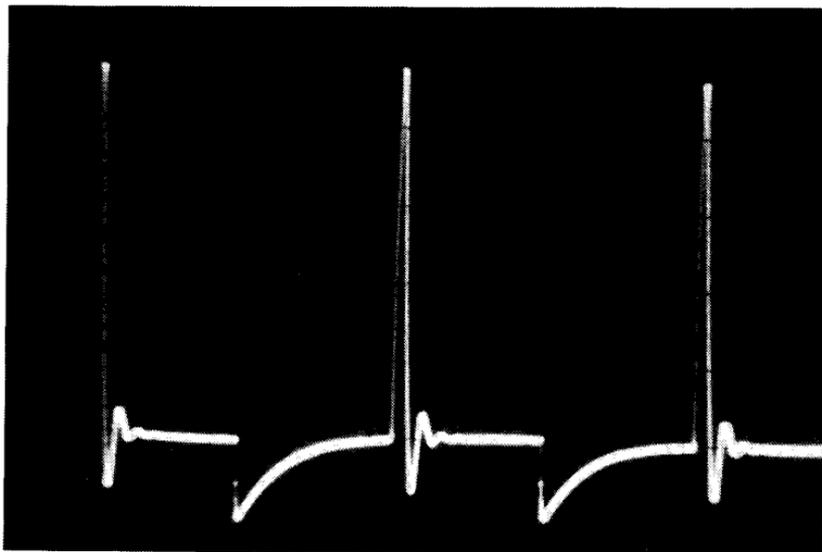


Fig. 29

électrodes d'une bougie. On voit apparaître quelques oscillations caractéristiques du circuit LC, très amorties par les pertes fer du transformateur.

La photographie de la fig. 30 montre deux oscillogrammes obtenus à l'aide d'une bobine réelle d'allumage automobile.

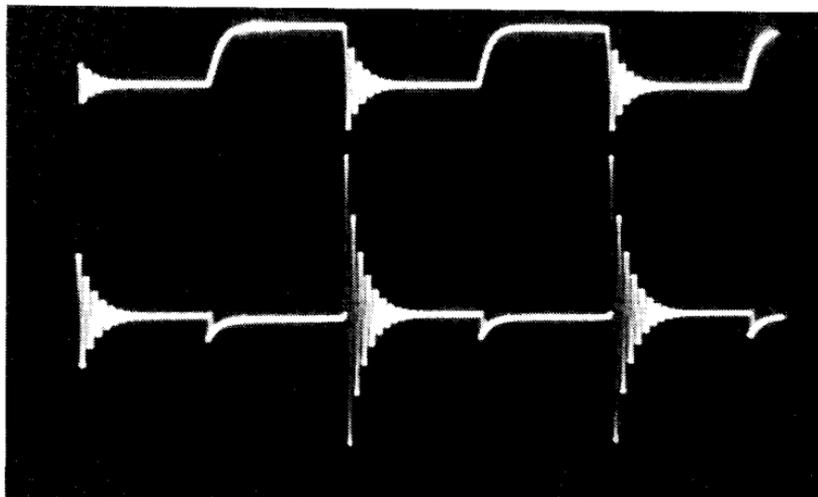


Fig. 30

Le circuit primaire de cette bobine (Bosch) a été monté en série avec un I.L.S., lui-même shunté par un condensateur de  $0,47 \mu\text{s}$ , et un petit accumulateur de  $1,2 \text{ V}$ .

L'oscillogramme du haut représente l'intensité dans le circuit primaire, tandis que l'oscillogramme du bas reproduit les variations de la tension secondaire aux bornes de la bobine.

La tension maximale, voisine de  $2000 \text{ V}$  serait suffisante pour produire, dans l'air, à la pression atmosphérique, des étincelles entre les électrodes d'une bougie. Dans ce cas, les oscillogrammes sont modifiés.

---