LA SELF-INDUCTION

NOUS avons déjà vu (Le Haut-Parleur N° 1511 de juillet 1975) ce qu'est le phénomène dit « induction ». Il s'agit de la production d'électricité par variation de flux magnétique dans un bobinage. Comme la notion de « flux » magnétique n'est pas évidente, nous l'avons rattachée à celle, un peu arbitraire, de « nombre de lignes de force ».

Donc, quand on fait **varier** (ce verbe est **fondamental**) le flux magnétique qui passe dans une bobine, on fait apparaître, aux bornes de la bobine, une tension dite « induite ». Pour faire varier le flux, il y a essentiellement trois méthodes :

— Changer la force du champ magnétique (par exemple en approchant ou en éloignant un aimant dans l'axe de la bobine) ;

— Changer la direction du champ par rapport à l'axe de la bobine, par exemple en inclinant celle-ci par rapport à la direction du champ) ;

— Changer la surface de la bobine, par exemple en écrasant celle-ci, le moyen étant évidemment peu pratique.

Comme nous l'avions souligné, le phénomène de l'induction est d'une extrême importance : la quasi-totalité de l'électricité que nous consommons est produite par induction.

UNE BOBINE QUI EN COMMANDE UNE AUTRE

Il y a un bon moyen de mettre en évidence le phénomène d'induction : il consiste à utiliser une première bobine, B_1 (fig. 1) dans laquelle on envoie un courant d'intensité i variable, dont les lignes de force passent dans une autre bobine, B_2. On constate que, quand i varie, une tension induite e apparaît dans la seconde bobine. Une étude théorique et expérimentale permet de voir que la valeur de e est proportionnelle à la « dérivée » de i par rapport au temps, autrement dit à la vitesse de variation de i : il y a M volts de tension e par ampère par seconde de vitesse de variation de i. Le coefficient M caractérise les deux bobines, leurs dimensions, leurs nombres de tours, leur position respective.

Revenons un peu sur cette question de position. Si l'on considère deux bobines données, indéformables l'une et l'autre, le bon moyen d'augmenter le coefficient M (dit coefficient d'induction mutuelle) consiste à mettre ces bobines sur le même axe et à les rapprocher.

A l'opposé, on arrive à annuler complètement M en plaçant les deux bobines comme le montre la figure 2.

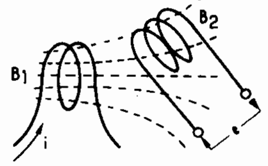


Fig. 1. – Le courant i variant dans une bobine B_1 provoque un champ magnétique variable au niveau de la bobine B_2 : il y « induit » une tension e.

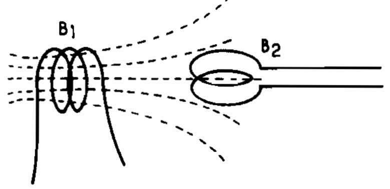


Fig. 2. – Avec cette disposition de la bobine B_2, les lignes de force de la bobine B_1 ne peuvent pas passer dans les spires de B_2. Il n'y a pas d'influence du courant passant dans B_1 sur la bobine B_2 ; on dit que les bobines sont à couplage nul.

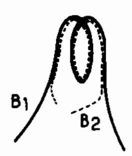


Fig. 3. – Pour que le « couplage » de la bobine inductrice B_1 à la bobine induite B_2 soit le plus serré possible, la meilleure méthode consiste à bobiner B_1 (trait plein) et B_2 (trait pointillé) avec « deux fils en main ».

Les lignes de force issues de la bobine B_1 ne peuvent pas traverser les spires de la bobine B_2. On dit qu'il s'agit d'une disposition à couplage nul, couramment utilisée pour des bobinages d'amplificateurs haute fréquence, dans lesquels on désire que la variation du courant dans l'un d'eux induise aussi peu de tension que possible dans un autre.

Donc, si l'on veut augmenter le « couplage » entre les deux bobines, il faut mettre celles-ci sur un même axe, proches l'une de l'autre, et leur donner le même diamètre. En effet, si B_1 a un diamètre supérieur à celui de B_2, il y aura des lignes de force produites par B_1 qui ne passeront pas dans B_2. Si c'est le diamètre de B_2 qui est le plus grand, une partie de la surface des spires de B_2 sera inutile.

L'idéal, pour rapprocher plus encore les bobines, serait de les bobiner en même temps, avec la technique « deux fils en main », comme le montre la figure 3, sur laquelle nous avons représenté le fil de la bobine B_1 en trait plein et celui de B_2 en pointillé, pour que l'on puisse les distinguer.

CHARITÉ BIEN ORDONNÉE...

... Commence par soi-même. Alors, on peut se demander pourquoi la bobine B_1, capable de produire des tensions d'induction dans des bobines proches, et ce d'autant mieux qu'elles sont plus proches, ne serait pas susceptible d'en produire dans... elle-même.

Or, c'est exactement ce qui se produit : quand l'intensité du courant qui passe dans un bobinage varie, il apparaît, aux bornes de ce bobinage, une tension proportionnelle à la vitesse de variation de l'intensité (en ampères par seconde).

Ce phénomène s'appelle la « self-induction », ou, pour ceux que l'utilisation de termes anglais rebute (« self » veut dire « soi-même »), on peut le nommer « auto-induction ».

Ce qui vient en compliquer l'étude est le fait suivant : tout bobinage est réalisé en fil, donc affecté de résistance. Dès lors, le passage de courant dans un fil ayant de la résistance produit dans ce fil une chute de tension (même si le courant est parfaitement continu). On aura donc toujours, aux bornes du bobinage, la somme de deux tensions :

— celle qui est due à la loi d'Ohm, via la résistance du fil, et qui donne une tension proportionnelle à l'intensité du courant, même si cette intensité est constante ;
— celle qui est due au phénomène de self-induction, donnant une tension proportionnelle à la vitesse de variation de l'intensité, donc nulle en cas d'intensité constante.

Le mélange des deux effets ne va pas simplifier l'étude du phénomène. Nous chercherons donc à faire en sorte que l'effet de self-induction, par exemple, soit bien supérieur à l'effet de résistance. Nous y arriverons en utilisant une bobine dont la résistance soit faible (mais qui comporte cependant beaucoup de tours pour que le phénomène de self-induction soit important), dans laquelle nous ferons passer une intensité pas trop élevée, dont la variation en fonction du temps soit très rapide.

La première expérience à réaliser est la suivante.

On prend une petite lampe à néon dont on commence par vérifier qu'elle ne s'allume pas si on lui applique (à travers une résistance de plus de 47 kΩ par précaution) une tension continue de moins de 65 V, ou une tension alternative de moins de 45 V efficaces.

On la monte alors comme l'indique la figure 4. Sur cette figure, T désigne un transformateur dont on n'utilisera que le primaire, par exemple un transformateur d'alimentation bien classique prévu pour une puissance secondaire de 50 à 100 VA (un transformateur d'alimentation pour amplificateur BF avec un secondaire 48 V 2 A convient parfaitement). La pile P permet d'envoyer du courant dans le primaire de T à travers le contact K quand ce dernier est fermé, la lampe au néon L est montée en parallèle avec ce primaire.

Si la résistance du primaire est très faible (elle peut descendre en dessous de 2 Ω), il vaut mieux prendre une pile P de 1,5 V. Si la résistance de ce primaire dépasse 20 Ω, une pile de 4,5 V est plus indiquée.

On ferme le contact K : du courant commence à passer dans le primaire de T. Après une seconde ou deux, on ouvre K et l'on constate que la lampe à néon s'illumine nettement en rouge, pendant peu de temps, mais avec une luminosité importante.

Il y a donc eu, aux bornes du primaire de T, au moment de l'ouverture de K, une tension suffisante pour allumer L, soit plus de 65 V, alors que la pile P ne peut donner que 1,5 ou 4,5 V suivant les cas.

C'est le phénomène de self induction qui peut seul expliquer l'allumage de la lampe. En aucune façon, l'« effet Ohm » (apparition de tension aux bornes d'une résistance parcourue par un courant) ne peut donner une tension supérieure à celle de la pile.

D'ailleurs, si le bobinage s'y prête (ce qui est le cas le plus courant), on peut très bien remplacer la lampe L de la figure 4 par un chapelet de deux, trois, ou même quatre lampes du même type, montées en série, le tout en parallèle sur le bobinage. Avec une seule pile de 1,5 V, à l'ouverture du circuit, les lampes s'allument toutes ensembles : s'il y en a quatre, cela suppose que la tension aux bornes du bobinage, lors de la coupure, a dépassé 280 V !

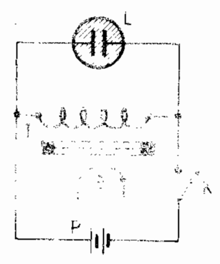


Fig. 4. – Expérience montrant les phénomènes de « self-induction ». Lorsque l'on coupe le courant qui passe dans le bobinage T (primaire de transformateur par exemple), la surtension aux bornes de T est suffisante pour allumer la lampe à néon L [illegible] plus de 70 V pour s'allumer, alors que l'on n'a utilisé qu'une pile P de 1,5 V (par exemple) pour alimenter T.

L'EXPÉRIENCE « SADIQUE »

Certains professeurs (que nous n'approuvons pas) pensent que le phénomène de self-induction marquera plus vivement les esprits si l'on procède sans lampe à néon, cette dernière étant remplacée par... les doigts de l'opérateur. Ils conseillent donc à l'élève de tenir les deux fils (nus) reliés aux extrémités du bobinage, de les brancher sur la pile, puis de les retirer : l'apparition de la tension de self-induction dans le bobinage est alors décelée par une « châtaigne » mémorable que ressent le malheureux expérimentateur.

Il arrive d'ailleurs fréquemment qu'un technicien (surtout un débutant) fasse cette expérience désagréable, tout simplement en mesurant, avec un ohmmètre à pile, la résistance d'un enroulement de transformateur : lorsque l'on débranche les fils reliés à l'enroulement, après la mesure, on coupe le courant brusquement dans le bobinage. Or, avec un ohmmètre à pile, on peut envoyer jusqu'à 0,1 A dans l'élément dont on veut mesurer la résistance. A la coupure du courant, la surtension peut atteindre plusieurs centaines de volts. Précisons bien que, dans ce cas comme dans celui de l'expérience « sadique », la secousse ressentie est sans danger, mais nous n'irons évidemment pas jusqu'à dire qu'elle est agréable...

VOYONS LES CHOSES DE PLUS PRÈS

Nous reviendrons plus loin sur les lois de la self-induction, mais il y a, dès maintenant, une chose que nous devons expliquer. La première question que pose quelqu'un devant lequel on réalise l'expérience de la figure 4 est la suivante : « Pourquoi la lampe à néon s'allume-t-elle lors de la coupure du courant et pas lors de son établissement ? ».

C'est très logique de demander cela : il devrait y avoir une variation d'intensité aussi brusque lors de la fermeture du contact K que lors de son ouverture. Il devrait donc en résulter une tension de self-induction dans les deux cas.

La réponse précise à cette question nécessite des détails dont nous parlerons plus loin. On peut toutefois indiquer que, lors de la fermeture du circuit, contrairement à ce que l'on pourrait penser, l'augmentation de l'intensité dans le bobinage n'est pas rapide. Cette intensité monte, en effet, progressivement de zéro à sa valeur de régime (définie par la résistance en continu de l'enroulement et la tension de la pile). Cette montée progressive est due à la self-induction : la tension correspondante lutte contre celle de la pile et retarde d'autant la montée de l'intensité.

Mais, lorsque l'on coupe le circuit, on ne laisse plus le bobinage régler lui-même la vitesse de variation de l'intensité en fonction du temps : on impose une variation brutale de cette intensité. La réaction du phénomène de self-induction est donc, elle aussi, beaucoup plus brutale.

Comme on le précisera ci-après, le phénomène de self-induction est tout à fait analogue à l'inertie en mécanique. L'inertie fait que tout corps doué de masse oppose une « force d'inertie » à toute variation de vitesse. Si l'on veut accélérer le corps (augmenter sa vitesse), il faut lutter contre la force d'inertie qui se manifeste dans le sens opposé au mouvement. A l'opposé, quand on veut ralentir un corps doué de masse, il faut lutter contre la force d'inertie, dirigée dans le sens du mouvement, qui tend à faire continuer le mouvement du corps.

Prenons un corps doué de masse (donc d'inertie) et primitivement immobile. Si nous le soumettons brusquement à une force destinée à le mettre en mouvement, sa vitesse ne variera pas d'une façon discontinue : elle va s'accroître progressivement. Une fois que le corps est en mouvement, arrêtons-le brutalement en le faisant buter contre un obstacle dur et indéformable : c'est là qu'il y aura du dégât, car, en lui imposant une variation brutale de vitesse, on provoque le déchainement de forces d'inertie considérables.

Peu de gens ont eu la curiosité de calculer la valeur de la force exercée par un marteau moyen (masse 0,6 kg) manié par un enfant, au moment où ce marteau enfonce de 0,5 mm un clou : on trouve plus d'une tonne !

FAISONS CONNAISSANCE AVEC LE « HENRY »

Pour définir avec plus d'exactitude le phénomène de self-induction, nous dirons que, momentanément, nous considérons un bobinage dont nous pouvons négliger la résistance. Il n'y aura donc, aux bornes de ce dernier, que des tensions dues aux phénomènes de self-induction.

Différents bobinages, également dénués de résistance, réagiront différemment aux variations de courant suivant qu'ils comportent plus ou moins de tours de fil, que ce fil est bobiné sur un mandrin de plus ou moins grand diamètre, qu'il y a ou non un noyau magnétique dans le bobinage, etc.

Nous comparerons donc les différents bobinages en y faisant passer un courant qui varie toujours à la même vitesse, par exemple à la vitesse de variation unité (soit de un ampère par seconde) et en comparant les tensions de self-induction que ce courant variable produit dans ces bobinages.

La tension produite est proportionnelle à la vitesse de variation du courant (les « matheux » diront qu'elle est proportionnelle à la dérivée

$$\frac{di}{dt}$$

de l'intensité i par rapport au temps t). Elle est également fonction d'un certain coefficient, dit coefficient de self induction, qui caractérise le bobinage.

Ce coefficient, toujours désigné par la lettre L, figure dans la formule donnant (en valeur arithmétique) la tension e aux bornes du bobinage parcouru en fonction de la vitesse de variation

$$\frac{di}{dt}$$

de l'intensité en fonction du temps :

$$e = L \frac{di}{dt}$$

Précisons que, le plus souvent, on rencontre, dans cette formule, un signe – avant le L, pour exprimer le caractère « contestataire » de la self-induction, sur lequel nous reviendrons.

On en déduit que si, dans un bobinage dont la résistance est négligeable, on fait varier l'intensité avec une vitesse

$$\frac{di}{dt}$$

unité, soit à raison de un ampère par seconde, on trouvera aux bornes du bobinage une tension de self-induction qui s'exprime par un nombre de volts égal au coefficient L.

Ce coefficient se mesure en « Henrys » (ou avec ses sous-multiples comme le millihenry, ou mH qui vaut un millième de Henry, ou le microhenry, ou μH, qui vaut un millionnième de Henry).

Donc un bobinage ayant un coefficient de self-induction de un Henry présente à ses bornes une force électromotrice d'induction de un volt quand le courant qui le traverse varie à raison de un ampère par seconde.

Précisons tout de suite que le Henry est une unité très grande : si l'on fait un bobinage de quelques tours sans noyau magnétique sur un mandrin de quelques centimètres de diamètre, on arrive à un coefficient de self-induction qui se compte en microhenrys : pour dix tours sur un diamètre de cinq centimètres, à deux spires par centimètre de longueur, on arrive à un peu moins de trois microhenrys.

Si l'on veut arriver à un Henry sans utiliser de noyau magnétique il faudra, par exemple réaliser une bobine sur un mandrin de diamètre

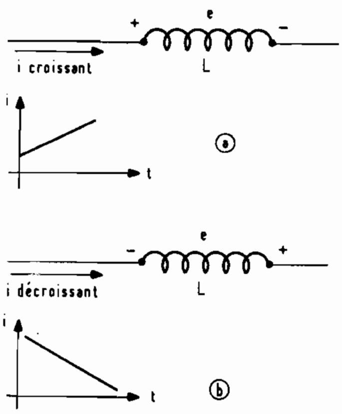


Fig. 5. – Lorsque l'on veut faire croître le courant dans un bobinage (a), la tension de self-induction tend à s'y opposer : elle est en sens opposé du passage du courant. A l'opposé, quand on essaye de faire décroître le courant (b), la tension de self-induction est dans le sens du passage : elle tend encore à s'opposer à la décroissance du courant.

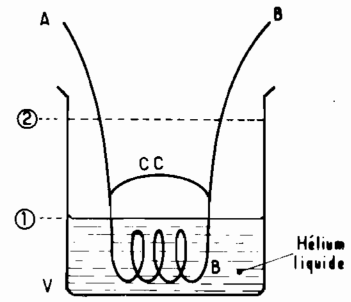


Fig. 6. – On utilise ici la « supra-conductivité » (disparition totale de la résistance) du plomb. Quand l'hélium liquide est au niveau (1), seule la bobine est supra-conductrice, le fil CC ne l'est pas. En faisant monter le niveau de l'hélium en (2), on court-circuite la bobine par le fil CC, devenu, à son tour, supra-conducteur.

initial 8 cm, de longueur 10 cm sur laquelle on bobinera 4 100 spires de fil émaillé de 0,7 mm (ce qui représente 1 300 m de fil, avec une résistance de 60 Ω environ).

Dès que l'on utilise un noyau magnétique, les choses changent et le Henry devient accessible (on peut même rencontrer des bobinages énormes, ou en fil très fin, qui totalisent plus de 100 H, le H étant le symbole du Henry).

ET TOUJOURS... UN BOBINAGE « RÂLEUR »

Prenons un bobinage doué de self-induction et faisons-y passer un courant dont l'intensité i croisse au cours du temps (fig. 5a).

Quel sera le sens de la force électro-motrice d'induction. autrement dit de la tension aux bornes du bobinage ? C'est ici que nous voyons apparaître pour la première fois le caractère fondamental de la self-induction, qui permet de retrouver sans difficulté les sens des tensions et qui est le suivant :

Le phénomène de self-induction tend toujours à s'opposer à la variation de courant qui lui a donné naissance.

Il ne s'agit d'ailleurs là que d'un aspect d'une loi plus générale dite Loi de Le Chatelier, qui dit que toute action sur un système physique à l'équilibre provoque une évolution du système tendant à lutter contre ladite action. En d'autres termes, quand on ennuie un système physique il se défend. Il n'y a là qu'un aspect de la « rouspétance universelle ».

Revenons à notre figure 5 (a). Comment on essaye d'augmenter l'intensité du courant, comment le bobinage peut-il s'opposer à cette croissance ? Tout simplement en développant à ses bornes une force contre électro-motrice, dans le sens indiqué sur la figure. Ainsi, la tension de self-induction va gêner l'augmentation de l'intensité.

A l'opposé (fig. 5 b) faisons maintenant décroître l'intensité. Le bobinage va faire naître à ses bornes une tension e qui tend à aider le passage du courant, donc à s'opposer à sa diminution.

Le bobinage se comporte à l'égard de l'intensité comme la masse d'un corps doué d'inertie agit sur la vitesse de ce corps.

En effet, quand un corps doué d'une masse m se déplace à la vitesse v (nous supposerons qu'il se déplace sur une ligne droite), si l'on veut faire varier sa vitesse au cours du temps, il réagira par une force F :

$$F = -m \frac{dv}{dt}$$

Le terme $\frac{dv}{dt}$ (une dérivée) ne doit pas effrayer les gens qui n'ont pas l'habitude de ces notations. Il s'agit tout simplement de la vitesse de variation... de la vitesse. Evidemment, la définition est peu claire en raison de la présence du mot vitesse à deux endroits avec des sens un peu différents.

Il vaudrait mieux, pour éviter une ambiguïté, parler de la « rapidité de variation de la vitesse ». On la compte donc en divisant l'accroissement de vitesse pendant un temps donné par ce temps. On l'exprime par conséquent en mètres par seconde/par seconde. Comme on divise deux fois une longueur (mètre) par un temps (seconde), une première fois pour avoir la vitesse, une seconde fois pour avoir la rapidité de variation de cette vitesse, on peut parler de « mètres par (seconde x seconde) », ou de « mètres par seconde carrée » (m/s^2). Les mécaniciens nous diront que cette grandeur est bien connue : on l'appelle l'« accélération ».

Ainsi, lorsqu'un corps doué de masse est soumis à une force constante, la rapidité de variation de sa vitesse est constante. La vitesse augmente donc régulièrement, proportionnellement au temps. On dit que l'accélération est constante (mouvement uniformément accéléré). C'est le type de mouvement que prend, par exemple, un corps soumis à l'action de la pesanteur, tout au moins tant que sa vitesse n'est pas trop grande (sinon, le frottement de l'air vient perturber la loi de mouvement en réduisant la force appliquée au corps).

La masse d'un corps, déterminant son inertie, se traduit, en quelque sorte, par un « désir de statu quo ». Il est difficile d'accélérer le corps : il réagit par une force d'inertie opposée au sens du mouvement. Il est difficile également de freiner le corps : il réagit par sa force d'inertie, dans le sens du mouvement.

Le bobinage ne fait pas autre chose : il « proteste » toujours contre toute tentative de modification de l'intensité qui le traverse, gênant la diminution de l'intensité par une force électro-motrice dans le sens du courant, gênant de même toute augmentation de courant par une force contre-électro-motrice (dans le sens opposé au courant).

L'analogie va encore plus loin. On peut démontrer qu'un corps doué d'une masse m et d'une vitesse v contient, du fait de sa vitesse, une énergie, dite « cinétique », qui s'exprime par la formule :

$$E = \frac{1}{2} m v^2$$

(cette énergie est en Joules si la masse est en kilogrammes et la vitesse en mètres par seconde).

Parallèlement, on peut démontrer qu'un bobinage dont le coefficient de self-induction est L et qui est parcouru par un courant d'intensité i contient une énergie :

$$E = \frac{1}{2} L i^2$$

(E en joules avec L en Henrys et i en ampères).

UN TABLEAU DE CORRESPONDANCE

Pour bien mettre en évidence le parallélisme des phénomènes, nous avons rassemblé dans le tableau ci-contre les aspects correspondants de l'inertie et de la self-induction.

MECANIQUE	ELECTRICITÉ
Inertie	Self-Induction
Masse m (kg)	Coefficient de self-induction L (H)
Vitesse (m/s)	Intensité (A)
Rapidité d'accroissement de la vitesse, ou accélération (m/s^2)	Vitesse de variation de l'intensité (A/s)
Force n'inertie F (N)	Tension de self-induction e (V)
$F = - m \frac{dv}{dt}$	$e = - L \frac{di}{dt}$
Energie $E = 1/2\ m\ v^2$	Energie $E = 1/2\ L\ i^2$
Mise en route progressive sous l'effet d'une force constante	Augmentation progressive de l'intensité sous l'effet d'une tension constante
Vitesse nulle ou constante en l'absence de force	Courant nul ou constant en l'absence de tension
Effet de choc par arrêt brusque	Surtension élevée par coupure du courant
Tendance à maintenir la vitesse constante en s'opposant à ses variations	Tendance à maintenir l'intensité constante en s'opposant à ses variations
Impossibilité d'une variation instantanée de la vitesse	Impossibilité d'une variation instantanée de l'intensité

REVENONS SUR LES ASPECTS DE LA SELF-INDUCTION

Il est important de bien comprendre comment varie le courant dans un bobinage (que nous supposons toujours parfait, sans aucune résistance) en fonction de la tension que l'on applique à ses bornes.

Le premier cas, le plus simple, est celui où l'on n'applique aucune tension à ce bobinage ; on a réuni ses deux extrémités alors que ledit bobinage était parcouru par un courant d'intensité i.

Il n'y a aucune résistance, donc aucune perte de puissance, donc l'énergie que contient le bobinage doit demeurer constante, ce qui implique que l'intensité du courant en fait autant : le courant ne change pas.

Bien sûr, cette affirmation choque : comment le courant pourrait-il passer indéfiniment dans le bobinage ? Il se trouve que l'on peut, si curieux que cela paraisse, réaliser pratiquement l'expérience.

On peut, en effet, rendre rigoureusement nulle la résistance d'un fil de plomb. D'accord, ce n'est pas facile : il faut le tremper dans l'hélium liquide. Sa résistance disparaît alors totalement, le plomb étant devenu ce que l'on appelle un « supra-conducteur ».

Insistons bien sur le fait qu'il est totalement impossible de trouver le moindre résidu de résistance, si petit soit-il, au plomb ainsi refroidi.

Procédons alors à l'expérience suivante (fig. 6). Dans un vase spécial V plaçons une bobine de fil de plomb B dont les deux extrémités sont court-circuitées par un fil de plomb CC (ou semblent l'être...).

Mettons de l'hélium liquide dans le vase V jusqu'au niveau (1). La bobine devient supra-conductrice. Elle est shuntée par le fil CC qui représente une résistance très faible, peut-être un millième d'ohm (mais pas nulle car ce fil n'est pas dans l'hélium liquide), qui n'en est pas moins **infinie** par rapport à celle de la bobine, cette dernière résistance étant rigoureusement nulle.

Donc, si l'on envoie du courant par les fils A et B, tout passera dans la bobine B et rien dans CC.

Pendant que le courant passe, faisons monter le niveau de l'hélium jusqu'en (2). Le brin de plomb CC devient à son tour supra-conducteur et la bobine est court-circuitée. On peut cesser d'envoyer le courant par les fils A et B et débrancher ces derniers.

Maintenant, le courant va continuer à passer indéfiniment dans la bobine B, sans la moindre variation. Certains demanderont : « Comment le sait-on ? » Rien de plus simple que de le vérifier : le passage du courant dans une bobine, supra-conductrice ou non, produit un champ magnétique. On voit que, au voisinage de la bobine, il y a un champ magnétique parfaitement constant (du moins, tant que l'on maintient la température ultra-basse requise pour la supra-conductivité).

Voilà donc un cas où une bobine à laquelle on n'applique aucune tension est parcourue par un courant constant (insistons bien sur le fait que, quand nous disons « constant », il ne s'agit pas d'une approximation : on ne constate aucune variation du champ magnétique – donc de l'intensité du courant – pendant des semaines si l'on maintient le froid).

Pour les expériences réalisées avec nos pauvres conducteurs qui ne sont pas « supra », toute bobine court-circuitée sur elle-même ne maintient pas une intensité constante : cette dernière diminue progressivement en raison des pertes par échauffement du fil (effet Joule). Mais on peut trouver des cas où cette diminution est relativement lente.

CAS D'UNE TENSION CONSTANTE

Supposons (fig. 7) que nous ayons un bobinage B dont le coefficient de self-induction est L et que l'on connecte au temps zéro la pile de tension V à ce bobinage.

On peut conclure des lois de la self-induction que la tension qui va se développer aux bornes du bobinage est égale à :

$$L\frac{di}{dt}$$

proportionnelle au coefficient de self-induction L et à la vitesse de variation

$$\frac{di}{dt}$$

de l'intensité.

Or, cette tension ne peut être qu'égale à V (nous supposons la pile sans résistance interne) puisqu'il n'y a aucune résistance dans le circuit.

Nous avons donc :

$$L\frac{di}{dt} = V$$

d'où :

$$\frac{di}{dt} = \frac{V}{L}$$

Or V/L est une constante. Dire que

$$\frac{di}{dt}$$

est constant, c'est dire que la vitesse de variation de i en fonction du temps est constante, donc que i augmente régulièrement, chaque seconde d'un certain nombre d'ampères (ce nombre étant d'ailleurs précisément V/L).

L'intensité doit donc augmenter suivant une loi linéaire :

$$i = \frac{V}{L}t$$

c'est-à-dire suivant la loi de la courbe (1) (trait gras) de la figure 8.

C'est une conséquence directe de la définition du coefficient de self-induction. On dit qu'un bobinage de un Henry est celui aux bornes duquel la tension de self-induction est de un volt quand le courant dans le bobinage varie de un ampère par seconde.

Donc, dans ce même bobinage de un Henry, la tension aux bornes est de A volts si le courant varie de A ampères par secondes. Si le bobinage a un coefficient de self-induction de L Henrys, un courant qui varie de A ampères par seconde provoquera, à ses bornes, une tension de A x L volts.

La courbe (1) de la figure 8 choque un peu : on admet mal ce courant dont l'intensité augmente indéfiniment (surtout en période d'économie d'énergie !).

Il y aura, en fait, des raisons qui vont modifier un peu le résultat pratique. D'abord, la pile ne peut débiter un courant infini (elle a sa résistance interne). Ensuite, le bobinage, s'il n'est pas supra-conducteur, a tout de même une petite résistance. Tout cela joint, on arrive à une variation de courant qui se fait suivant la loi de la courbe (2) (pointillés) de la figure 8. Cette courbe part tangentiellement à la courbe (1), se confond presque avec elle au début, mais s'en écarte pour plafonner à une ordonnée limite. La courbe a une tangente « à l'infini », que l'on nomme « asymptote », dont l'ordonnée est tout simplement V/R, R étant la résistance totale du bobinage, en y incorporant la résistance interne de la pile et celle des fils de connexion.

UN PETIT COUP DE BALAIS...

Nous avons beaucoup insisté sur le fait que la courbe (2) se confondait très étroitement avec la courbe (1) au début. Et cela, c'est très important.

En effet, il est fréquent, dans la pratique, de rencontrer des exemples de bobinages alimentés par une tension constante et dans lesquels on considère que l'intensité du courant augmente suivant une loi linéaire du temps.

Le plus connu des lecteurs de la Revue est le balayage ligne (horizontal) des téléviseurs.

On sait, en effet, que le spot (point lumineux) qui forme l'image sur l'écran d'un tube de télévision est dévié par des champs magnétiques, produits par les bobines de balayage, groupées autour du col du tube.

En première approximation, la déviation du spot est proportionnelle à l'intensité du courant dans le bobinage. Or, pour réaliser le balayage horizontal, à 625 lignes en 1/25 de seconde, soit un aller et retour en 64 μs, avec à peu près 56 μs pour l'aller et 8 μs pour le retour, on doit obtenir un déplacement du spot à vitesse constante. Il est donc nécessaire d'avoir un courant qui croisse linéairement dans la bobine de déviation horizontale.

La solution que l'on a trouvée consiste à utiliser le résultat que nous avons établi plus haut : en appliquant une tension constante à un bobinage, on obtient dans ce dernier une

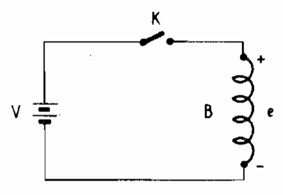


Fig. 7. – Lorsque l'on ferme l'interrupteur K, on applique la tension constante V aux bornes de la bobine L : le courant devrait croître proportionnellement au temps (croissance linéaire).

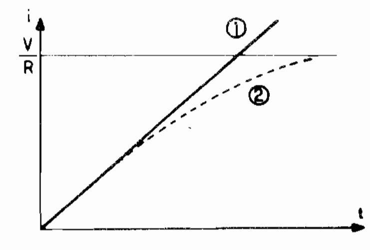


Fig. 8. – Quand un bobinage est alimenté sous une tension constante, l'intensité devrait croître proportionnellement au temps (1). En réalité, la présence de résistances diverses limite la montée de courant qui se fait suivant la courbe 2.

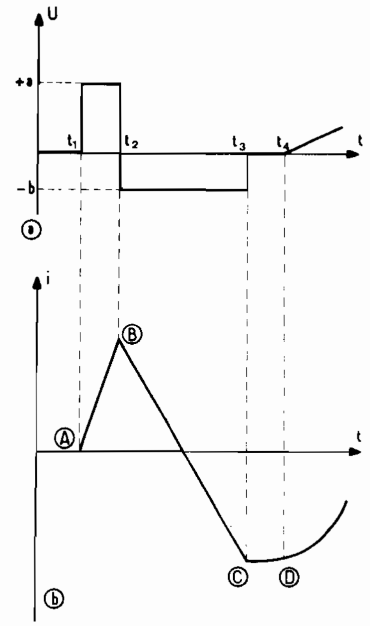


Fig. 9. – Lorsque l'on applique à un bobinage pur (sans résistance) une tension qui varie comme en (a), l'intensité varie comme en (b).

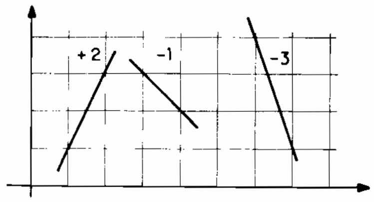


Fig. 10. – On définit la « pente » d'une droite comme le quotient des variations d'ordonnée par les variations d'abscisse d'un point qui se déplace sur la droite. On trouve ci-dessus des pentes de + 2, –1 et –3.

intensité qui, tout au moins au début, croît proportionnellement au temps.

On applique donc une tension constante aux bornes du bobinage de déviation horizontale pendant l'aller du spot, et l'on obtient automatiquement un déplacement à vitesse constante. Les lecteurs très au courant des détails de la télévision pourront objecter que l'on doit faire une « correction en S » pour tenir compte de la grande valeur de l'angle de déviation, mais le principe reste valable, à quelques détails près.

On a donc utilisé efficacement le phénomène de self-induction pour réaliser un balayage linéaire. Mais, hélas, le côté « rouspéteur » de la self-induction n'a pas disparu : lors du retour du spot, retour qui doit être très rapide, on est donc amené à faire varier très rapidement l'intensité du courant dans la bobine de balayage horizontal. La réaction de la self-induction sera brutale : il va se développer aux bornes de la bobine une tension très élevée. C'est même cette tension considérable qui rend souvent difficile la transistorisation des balayages horizontaux des tubes couleurs (ils nécessitent des bobinages de plus grande taille, donc affectés de coefficients de self-induction plus élevés que ceux des tubes noir et blanc). La surtension de retour est telle que l'on risque fort de détruire les transistors les plus adaptés à cette fonction.

La solution de la tension constante pour obtenir une montée linéaire de courant s'applique bien au cas du balayage horizontal, mais très mal au cas du balayage trame (balayage vertical). Pourquoi ? Tout simplement parce que, dans le cas de la déviation verticale, il ne s'agit plus de déplacer le spot en 56 μs, mais en 20 000 μs, disons plutôt en 20 ms (récurrence 50 Hz). Dans ces conditions, le

$$\frac{di}{dt}$$

dans le bobinage est beaucoup plus petit, les perturbations dues à la résistance du bobinage deviennent prédominantes et l'on ne peut plus se contenter de maintenir une tension constante.

AUTRES TYPES DE VARIATION DE COURANT

Nous allons maintenant supposer qu'un générateur de tension, sans résistance interne applique à un bobinage de coefficient de self-induction L une tension U qui varie en fonction du temps suivant une loi connue, et nous allons essayer d'en déduire la loi de variation du courant dans la bobine.

Nous supposerons (fig. 9 a) que la tension U, nulle au début, passe brusquement à la valeur + a au temps t_1, y reste jusqu'au temps t_2, où elle passe brusquement à la valeur –b, qu'elle garde jusqu'au temps t_3 où elle s'annule. La tension U reste alors nulle jusqu'au temps t_4, où elle commence à croître progressivement.

Nous supposerons aussi que le courant dans le bobinage était nul au départ (au temps zéro).

Il nous est alors facile de tracer la courbe de la figure 9 (b), donnant la variation de l'intensité du courant en fonction du temps.

Cette intensité va varier à partir du moment t_1. Sa variation sera linéaire (proportionnelle au temps). La courbe qui représente cette variation sera donc une droite. La pente de cette droite sera a/L puisque l'on doit avoir, pendant que la tension aux bornes du bobinage est a, une variation de i suivant la formule :

$$L \frac{di}{dt} = a$$

d'où :

$$\frac{di}{dt} = a/L$$

Rappelons que la pente d'une droite (fig. 10) est le rapport de la variation d'ordonnée à la variation d'abscisse d'un point qui se déplace sur cette droite. Dans le cas de la figure 10, nous avons représenté des segments de droites correspondant à des pentes successives (de gauche à droite) de 2, –1 et –3. La notation (qui effraye tant les « mathophobes »)

$$\frac{di}{dt}$$

représente la vitesse de variation de i en fonction de t, donc, lors d'une variation régulière de i (représentée par une droite), le rapport des variations de i aux variations de t qui leur ont donné naissance (si l'augmentation de i est de 0,0032 A pendant un temps de 0,001 s, cela correspond à une vitesse de variation :

$$\frac{di}{dt} = \frac{0{,}0032}{0{,}001} = 3{,}2 \text{ A/s.}$$

Donc, à partir du temps t_1, la valeur de i monte suivant une loi linéaire (représentée par une droite), à raison de a/L ampères par seconde, soit une pente de a/L pour la droite représentative de la variation de i.

Au temps t_2, la tension aux bornes du bobinage devient brusquement négative et égale à −b. L'intensité cesse donc brusquement d'augmenter pour se mettre à diminuer. La variation instantanée de la pente se traduit par un angle vif dans la courbe donnant i en fonction de t.

Nous avons supposé que b était deux fois plus petit que a et que la période t_3−t_2 était quatre fois plus longue que la période t_2−t_1.

Nous allons donc avoir une droite représentant i qui, à partir du point B, va descendre avec une pente moitié moindre que la pente qu'elle avait pour monter du point A au point B. Mais, comme elle descend quatre fois plus longtemps du point B au point C qu'elle n'était montée du point A au point B, elle va descendre, de B en C, deux fois plus qu'elle n'était montée de A en B.

Le point C aura donc une ordonnée négative, égale en valeur absolue à l'ordonnée du point B.

A partir du temps t_3, correspondant au point C, la tension aux bornes du bobinage s'annule. Aucun problème : le courant dans le bobinage va donc se maintenir constant.

Arrive le temps t_4 : la tension aux bornes du bobinage se met à croître progressivement. Nous aurons donc une augmentation de plus en plus rapide de l'intensité, c'est-à-dire que la courbe représentative de i en fonction de t ne sera plus une droite, mais une courbe, la concavité de cette courbe étant orientée vers le haut, ce qui traduit le fait que la pente de la tangente à la courbe (soit, encore et toujours, le sempiternel

$$\frac{di}{dt})$$

va en croissant.

Il est aussi très instructif de faire le contraire, de partir de la courbe de variation de i dans un bobinage pour en déduire la courbe de variation de la tension de self-induction aux bornes du bobinage.

CE QU'EST UN « EXTRA-COURANT DE RUPTURE »

Dans l'expérience de la figure 4, nous avons utilisé la surtension qui se produit aux bornes d'un bobinage lorsque l'on coupe le courant dans ce dernier pour allumer une lampe à néon. Mais il y a des cas où les effets de la self-induction, lors de la coupure du courant, sont bien plus dévastateurs.

Notre lampe à néon constituait une issue possible pour l'énergie contenue dans le bobinage, et cela se passait bien. Mais, si l'on doit couper un courant de forte intensité dans un bobinage doué d'un grand coefficient de self-induction, cela peut se passer très mal.

Comme la variation de l'intensité est extrêmement rapide, la tension de self-induction peut être très grande. Elle est souvent suffisante pour arriver à s'opposer à la coupure en faisant passer le courant sous forme d'un « arc » entre les pièces qui étaient en contact. Dans le meilleur des cas, cela se traduit par une étincelle bien visible : la dissipation de l'énergie du bobinage se fait en volatilisant le cuivre des dernières parties du contact à rester jointives lorsque l'on fait cesser le passage du courant. On peut toujours supposer que les paillettes qui établissent le contact ont d'abord une surface de contact importante, lorsque ces pièces se trouvent appliquées l'une contre l'autre par une force énergique.

Au moment où l'on veut faire cesser le contact, la pression sur les paillettes faiblit. La zone selon laquelle elles se touchaient diminue de surface, jusqu'au moment où elle se réduit à un simple point. Comme le phénomène de self-induction maintient l'intensité à une valeur presque constante, il va y avoir une densité de courant énorme dans ce point. Du cuivre sera volatilisé et il y aura étincelle.

Mais, si l'énergie contenue dans le bobinage est grande, les choses n'en resteront pas là. Quand les dernières zones de passage possible de courant se sont un peu séparées. au moment où l'étincelle vient de jaillir, la tension aux bornes du contact monte vertigineusement. Elle peut arriver à être suffisante pour provoquer un passage de courant dans la zone où la volatilisation du cuivre, lors de l'étincelle, a amorcé une ionisation de l'air. A ce moment, une sorte de ruban bleuâtre jaillit entre les pièces du contact, entretenant une volatilisation du métal et permettant le passage du courant. C'est l'« arc électrique », justement redouté, car il risque, dans les meilleurs cas, de détériorer gravement le contact, et même de mettre le feu. C'est ce phénomène que l'on appelle l'« extra-courant de rupture ». Comme on le voit, la self-induction n'est pas une plaisanterie.

On a toujours des difficultés quand on veut couper le courant brusquement dans un circuit doué de self-induction (or, malheureusement, on peut dire que **tous** les circuits sont plus ou moins doués de self-induction). Si l'on emploie un transistor, il faudra prévoir des moyens de protections, ainsi qu'une issue pour l'énergie contenue dans le bobinage.

Une méthode assez approximative pour limiter les dégâts consiste (fig. 11) à shunter le bobinage par un résisteur. Bien sûr, on prendra, pour ce dernier, une résistance élevée, pour que, lorsque l'on alimente le bobinage (qui a une résistance r), il ne passe qu'une fraction relativement réduite de l'intensité totale dans le résisteur R.

Quand on coupe brusquement le circuit qui alimente le bobinage (et qui a amené l'intensité du courant dans ce dernier à la valeur i), le courant i ne peut passer que par la résisteur R. Il commencera par avoir la valeur i (puisque l'intensité ne peut pas varier instantanément dans un bobinage), ce qui donne une tension maximale R i aux bornes de l'ensemble résisteur-bobinage. Après quoi, par suite de la dissipation de l'énergie contenue dans le bobinage par

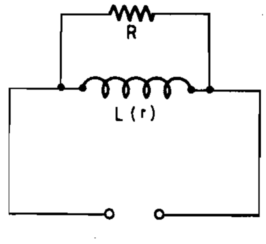


Fig. 11. – Pour limiter la surtension aux bornes d'un bobinage parcouru par une intensité i au moment où l'on coupe le courant, on peut shunter le bobinage par une résistance R : la surtension sera limitée à la valeur R i.

le résisteur, l'intensité va décroître progressivement.

Prenons un exemple numérique. Soit une bobine de relais, alimentée sous 24 V et ayant une résistance de 343 Ω, ce qui représente une intensité de régime de 24/343 = 0,07 A soit 70 mA. Si nous shuntons la bobine par un résisteur de 1 200 Ω, soit 3,5 fois plus que celle de la bobine, quand nous alimenterons le tout sous 24 V, il y aura 70 mA dans la bobine (utiles) et 20 mA dans R (perdus). Nous aurons tout de même envoyé 78 % de l'intensité totale dans la bobine.

Coupons l'envoi de courant à l'ensemble. Une microseconde avant cette coupure (nous supposons un interrupteur tellement parfait qu'il laissera les techniciens un peu rêveurs !), il passe 70 mA dans la bobine. Donc, une microseconde après cette coupure, il passe encore 70 mA dans la bobine. Comme ils ne peuvent passer que dans le résisteur, cela représente une surtension de :

$$1\,200 \times 0{,}07 = 84 \text{ V}$$

Ce n'est pas négligeable, mais ce n'est rien si on le compare à ce que l'on aurait pu avoir comme surtension si l'on avait laissé celle-ci se manifester sans rien faire pour s'en défendre. Dans beaucoup de cas, des techniciens ont constaté avec regret que ladite surtention était capable de détruire la bobine du relais, ou le transistor chargé de couper le courant, ou même les deux à la fois avec un peu de... chance !

LA SELF-INDUCTION EST-ELLE UNE CATASTROPHE ?

On pourrait conclure de ce qui précède que les phénomènes de self-induction constituent un véritable fléau aux conséquences uniquement désastreuses. Ce serait aller trop vite.

Si, dans de nombreux cas, on déplore vivement les effets de la nature inductive des circuits dans lesquels on doit couper rapidement un courant, il y a fort heureusement des quantités de cas où l'on utilise la self-induction d'un façon très intéressante.

Tout d'abord, nous avons vu qu'un bobinage inductif, s'il a une faible résistance, laisse parfaitement passer le courant continu, mais s'oppose à toute variation du courant. Il gênera donc efficacement les composantes alternatives éventuelles. Autrement dit, le bobinage pourra jouer un rôle de filtrage très efficace.

D'autre part, comme nous le verrons plus loin, un bobinage alimenté en alternatif se comporte comme une « pseudo-résistance » (on dit une « impédance ») proportionnelle à la fréquence. On utilisera donc le bobinage pour obtenir une impédance donnée à une fréquence donnée. On fera ainsi des filtres.

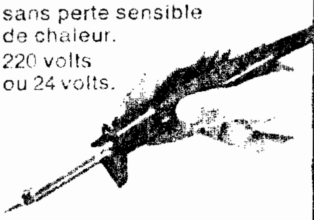
Enfin, et c'est là le plus important, nous verrons plus tard que, quand on associe un bobinage doué de self-induction et un condensateur, on obtient un circuit « oscillant », base de tous les oscillateurs, de tous les filtres sélectifs, de tous les circuits générateurs et amplificateurs de haute fréquence. Donc, sans la self-induction, il n'y aurait ni radio, ni télévision, ni fours à haute fréquence, ni allumage automobile, ni filtres... arrêtons nous là.

C'est l'immense importance de ce phénomène qui explique l'intérêt que nous lui portons, qui justifie que nous ayons mobilisé si longtemps l'attention des lecteurs que nous remercions de nous avoir suivi jusqu'ici.

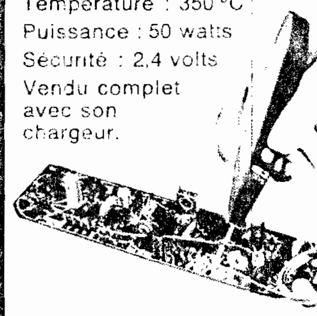
J.-P. OEHMICHEN
Ingénieur E.P.C.I.

toujours du
NOUVEAU!
R. DUVAUCHEL vous présente :

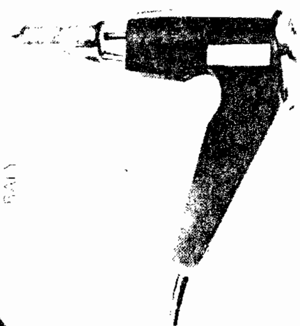
ZEVA
“VARIOMATIC”
Fer à souder Thermostaté
Température stabilisée au degré exact de chauffe désirée.
Sans transformateur ni régulateur.
Système de réglage de température par cran, à l'intérieur du manche.
Très fin, pratique, léger.
Sa puissance, 65 watts le rend indispensable pour un travail en chaîne sans perte sensible de chaleur.
220 volts ou 24 volts.



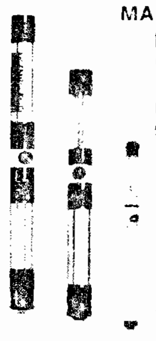
SOUDEUR
“WAHL ISO TIP”
à mini batterie incorporée
Fonctionne sans fil, sans courant, partout.
Eclairage du point de soudure sans ombre.
Léger, pratique, maniable.
Poids : 150 g
Longueur : 12 cm
Température : 350 °C
Puissance : 50 watts
Sécurité : 2,4 volts
Vendu complet avec son chargeur.



ZEVA
“DESSOUDEUR SOUDEUR”
de 35 watts, d'une précision remarquable, est parfaitement adapté pour le soudage et dessoudage des composants.
Léger, pratique, fonctionnant d'une seule main, donnant une aspiration juste et douce sans danger pour les circuits délicats.



POMPE
DESSOUDEUSE
“PRO INDUSTRIA”
Trois modèles :
dont la plus petite pompe dessoudeuse du monde.
MAXI SUPER
sans recul pour l'atelier, laboratoire etc.
MAXI MINI
pour le dépannage à l'extérieur etc.
MAXI MICRO
pour le dessoudage miniaturisé, micro soudage etc.
Longueur de la pompe 160mm
Largeur de la pompe : 12 mm
INTERIEUR de l'embout : 1,5 mm
Poids : 27 g



RENSEIGNEMENTS ET DOCUMENTATION :
EN VENTE CHEZ VOTRE DISTRIBUTEUR
PRO-INDUSTRIA (R. DUVAUCHEL)
3 bis, rue Casteres 92110 CLICHY 737.34.30 et 737.34.3