INITIATION A L'ELECTRICITE

le magnétisme fabrique de l'électricité

(Suite voir N° 1507)

LE COURANT ALTERNATIF

C'est l'existence du phénomène d'induction qui explique la production et l'utilisation généralisées du courant dit « alternatif », ce qui nécessite quelques explications.

La méthode la plus simple pour réaliser une machine productrice d'électricité par induction consiste à employer une bobine « rotor », R (fig. 11) qui tourne autour d'un axe A de son plan dans un champ magnétique H. La variation continuelle du flux passant dans la bobine, en raison de la rotation de cette dernière, produit une tension induite dans les spires de R. Pour recueillir cette tension, on relie les extrémités de la bobine à deux bagues, B_1 et B_2, isolées électriquement de l'axe, sur lesquelles frottent des balais, b_1 et b_2. C'est par les balais que passera le courant produit par induction dans la bobine.

La variation au cours du temps du flux passant dans la bobine est représentée par la courbe (a) de la figure 12. On suppose que l'on prend l'origine du temps au moment où le plan de la bobine contient la direction du champ magnétique : le flux est alors nul.

La bobine commence à tourner : elle se laisse alors traverser par un nombre croissant de lignes de forces, le flux augmente. Il en va ainsi jusqu'au temps t_1, où le plan de la bobine est perpendiculaire à la direction du champ : le

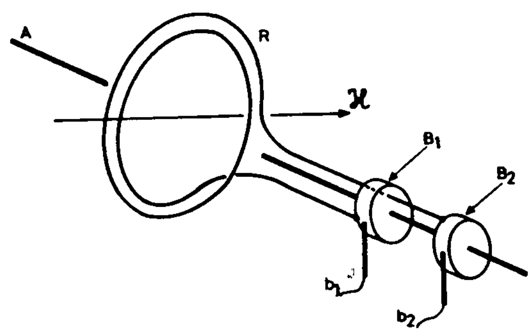

Fig. 11. – On peut aussi constituer un alternateur (générateur de tension alternative par induction a en faisant tourner une bobine R dans un champ magnétique H. La sortie du courant se fait par des bagues B_1 et B_2 sur lesquelles frottent des balais b_1 et b_2.

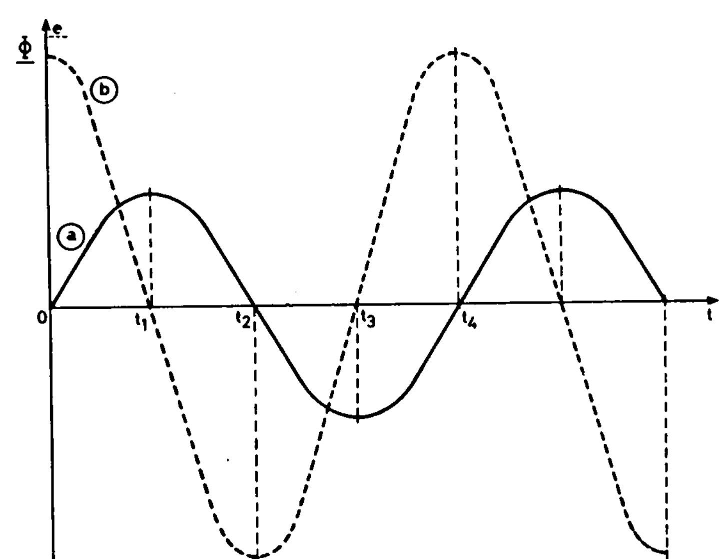

Fig. 12. – Le flux dans la bobine varie comme la courbe (a) en fonction du temps, ce qui donne une tension induite variant comme la courbe pointillée (b).

flux est alors maximal.

A partir de t_1, la bobine continuant à tourner, le flux qui la traverse diminue, et ce phénomène se poursuit jusqu'en t_2, où, après un demi-tour, la bobine est de nouveau traversée par un flux nul.

A partir de cet instant, il y a des lignes de force qui vont recommencer à passer dans la bobine, mais elles vont pénétrer dans celle-ci par l'autre face. Nous pouvons donc convenir de représenter alors le flux par un nombre négatif. Ce nombre va augmenter (en valeur absolue) jusqu'au temps t_3, puis se rapprocher de zéro, qu'il atteint au temps t_4, la bobine ayant fait un tour complet depuis le temps zéro.

A partir de la courbe (en trait plein) de la figure 12, donnant la variation du flux en fonction du temps, nous pouvons facilement trouver la valeur de la tension induite à chaque instant. Pour connaître la valeur de la « vitesse de variation » du flux, il est possible, par exemple, de tracer la tangente en un point à la courbe du flux et de voir la « pente » de cette tangente.

Au temps zéro, par exemple, cette pente est positive et relativement élevée. Cela donnera une tension induite de forte valeur.

Quand on va vers l'instant t_1, la pente de la tangente reste bien positive, mais elle est de plus en plus faible, la tangente devenant de plus en plus proche d'une parallèle à l'axe des temps (elle devient rigoureusement parallèle à cet axe au temps t_1). Il y aura donc diminution de la tension induite, qui passera par la valeur zéro au temps t_1.

La courbe en pointillé (b), de la figure 12 montre la variation de la tension induite en fonction du temps : nous obtenons ce que l'on appelle une tension « alternative », particulièrement facile à produire. Précisons que l'on utilise plus la machine dont le dessin est donné par la figure 9 que celle de la figure 11 pour engendrer une tension alternative, mais l'explication du fonctionnement est plus claire avec une machine du type de la figure 11.

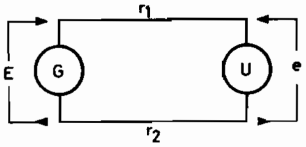

Fig. 13. – La distribution d'électricité depuis un générateur G jusqu'à un utilisateur U se heurte au problème de la « chute en ligne » : les résistances r_1 et r_2 des deux fils font que la tension e reçue par l'utilisateur est plus faible que la tension E produite par le générateur.

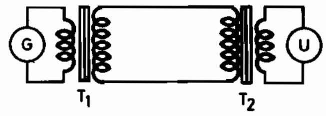

Fig. 14. – On minimise les pertes en ligne en élevant la tension au départ par le transformateur T_1 et en la ré-abaissant à l'arrivée par le transformateur T_2.

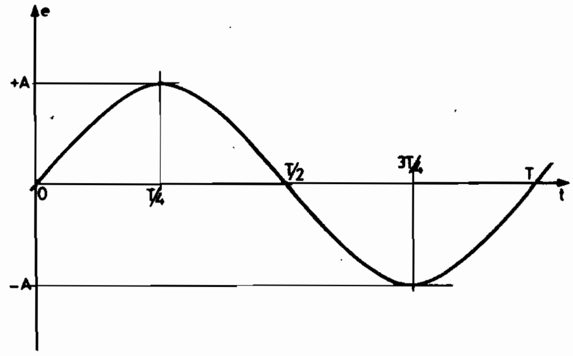

Fig. 15. – Une tension alternative varie entre un maximum + A et un minimum – A suivant une loi dite « sinusoïdale » de période T.

LE TRANSPORT DE L'ÉNERGIE EN COURANT ALTERNATIF

Le courant alternatif est donc facile à produire. Mais ce qui fait son principal intérêt est la facilité avec laquelle on le transporte, grâce aux transformateurs.

En effet, lorsque l'on envoie du courant électrique à grande distance, la plus grande difficulté que l'on rencontre est la « perte en ligne ». Il s'agit encore des défauts de cette horrible « résistance interne », dont nous avons dénoncé déjà tous les ravages qu'elle commet.

Supposons (fig. 13) qu'un générateur G (qui peut être une centrale électrique) produise de l'électricité à l'intention d'un utilisateur U. Deux fils, de résistances respectives r_1 et r_2, relient la source à celui qui emploie le courant.

Il y a donc, en série entre G et U, une résistance totale R

$$R = r_1 + r_2$$

Donc, quand l'utilisateur consomme un courant d'intensité i, la tension e dont il dispose n'est pas la valeur E qu'il pourrait avoir sans la ligne, mais une valeur réduite :

$$e = E - R\,i$$

L'utilisateur a donc une tension disponible inférieure à E et, fait plus grave encore, variable avec l'intensité. Le générateur G fournit une puissance

$$W = E\,i$$

alors que l'utilisateur reçoit une puissance inférieure w :

$$w = e\,i$$

Le reste, soit $P = (E-e)\,i = R\,i^2$ est perdu sous forme de chaleur le long de la ligne.

La conclusion que l'on tire immédiatement de ce calcul est la suivante : il faut diminuer R. Tout à fait exact, oui, mais... ce n'est pas facile !

Comme il est fort peu probable que l'on installe une « mini-centrale » à côté de chaque immeuble et à côté de chaque maison, on aura toujours des lignes fort longues entre G et U. Il est hors de question de leur donner un diamètre énorme, cela conduirait à un poids et à un prix démentiels, donc on ne peut réduire la résistance R des lignes autant qu'on le souhaiterait.

La conclusion est simple : pour diminuer la perte en ligne $R\,i^2$, puisque l'on ne peut guère réduire R, il faut diminuer i. Mais, comme la puissance à envoyer à U doit rester la même, on ne peut réduire i qu'en augmentant E et donc e.

Prenons un exemple numérique. Soit un usager qui, sous une tension e de 220 V, consomme une puissance w de 1,5 kW. Il lui faut donc une intensité de 1 500/200 = 6,82 A. Si la ligne qui le relie à la centrale a une résistance R de 5 Ω, il y aura 34,1 V de chute en ligne et la centrale devra avoir une tension E = 220 + 34,1 = 254,1, ce qui, avec une intensité de 6,82 A, représente une puissance envoyée de 1,73 kW, dont 232 W seront perdus en ligne. Il n'y aura que 86,6 % de la puissance envoyée par la centrale qui ira chez l'usager, alors que 13,4 % va se perdre en ligne.

Admettons maintenant que ce même usager utilise une tension de 2 200 V ; il ne demandera plus que 0,682 A, soit une chute de tension en ligne de 3,41 V. Il y aura donc à majorer la tension de la centrale de 3,4 V (ce qui est bien peu par rapport à 2 200 V) et l'on trouve facilement que la puissance fournie par la centrale va à 99,845 % à l'usager, la perte en ligne n'étant que de 0,15 %.

Seulement, tout cela est bien théorique : qui irait utiliser, sauf cas tout à fait spéciaux, du 2 200 V ?

C'est là que les transformateurs vont sauver la situation : on va mettre un transformateur élévateur de tension T_1 au départ, près de la centrale, et un transformateur abaisseur de tension T_2 au voisinage de l'usager (fig. 14).

Plus on doit aller loin dans le transport de l'énergie électrique, plus on a intérêt à élever la tension sur la ligne. Une valeur assez classique de tension est de 220 000 V sur les lignes, on essaye le 400 000 V et plusieurs recherches sont en cours pour généraliser l'emploi du 720 000 V et même de tensions dépassant le million de volts.

Il est bien évident que la manipulation de telles tensions pose de rérieux problèmes d'isolement. Aussi ne va-t-on pas employer un transformateur unique recevant du 220 000 V, par exemple, et donnant du 220 V. On emploiera un premier transformateur près de la ville alimentée, il recevra le 220 000 V et donnera du 60 000 V, déjà plus facile à distribuer dans la ville. Plusieurs autres transformateurs recevront, en différents quartiers, ce

60 000 V pour donner du 6 000 V ou du 2 000 V et c'est une tension de cet ordre qui sera distribuée aux transformateurs des immeubles, chacun alimentant une « colonne montante » en 220 V.

On voit à quel point l'emploi des transformateurs est généralisé dans la distribution de l'énergie électrique, qui aurait été presque irréalisable sans le phénomène de l'induction.

UNE QUESTION DE DÉFINITION

Nous reviendrons ultérieurement sur le courant alternatif et ses propriétés. Il nous semble utile de définir dès maintenant ce que l'on entend par « tension efficace » (on dit souvent « tension » tout court) pour le courant alternatif.

En réalité, la tension que délivre une source alternative varie sans cesse, ainsi que le montre la courbe (b) de la figure 12. On ne pourrait donc la définir totalement qu'en donnant la loi mathématique de cette variation au cours du temps, mais ce serait souvent beaucoup trop compliqué.

C'est la raison pour laquelle on a défini la « tension efficace », qui découle de l'utilisation de l'électricité pour le chauffage ou pour l'éclairage.

Nous supposerons tout d'abord qu'il s'agit de tension dite « sinusoïdale », dont la variation est représentée par la courbe de la figure 15. On voit que la tension varie entre un maximum +A et un minimum −A, la « période » (durée d'un cycle complet de variation) étant T. La variation « sinusoïdale » veut dire que la valeur de la tension à un instant t est donnée par :

$$e = A \sin (\omega t)$$

où ω est une grandeur, nommée « pulsation », proportionnelle à la fréquence F (nombre de périodes par secondes) suivant la loi :

$$\omega = 2 \pi F = \frac{2 \pi}{T}$$

Pour être moins prétentieux et ne pas affoler les lecteurs brouillés avec les mathématiques, nous donnerons un exemple simple (auquel nous reviendrons souvent) de variation sinusoïdale.

Imaginons (fig. 16) un tourne-disque T, placé près d'un mur vertical M, le tout étant éclairé par une lampe L ; dans le plan du plateau du tourne-disque, très loin de ce dernier pour que les rayons de la lampe puissent être considérés comme parallèles. En outre, la droite joignant la lampe à l'axe O du plateau du tourne-disque est perpendiculaire au mur. L'ombre de l'axe O sur le mur est projetée en O'.

Plaçons sur le plateau un petit objet P dont l'ombre se projette en P' sur le mur M et faisons tourner le plateau régulièrement (par exemple à 33 t/mn).

Nous allons voir l'ombre P' décrire un mouvement oscillant, de part et d'autre de O'. Ce mouvement, précisément, est sinusoïdal.

C'est le type de mouvement que l'on rencontre dans le cas des systèmes oscillants, généralement composés d'un corps doué de masse, pouvant se déplacer de part et d'autre d'une position donnée, dite « position d'équilibre », ramené vers cette position par une force (ou un couple, s'il s'agit d'un mouvement de rotation, le couple étant une « envie de tourner », exactement comme la force est une « envie de bouger »), cette force étant proportionnelle à l'écart entre la position du corps et sa position d'équilibre.

C'est, entre autres, le mouvement d'un pendule, corps lourd, suspendu à un point fixe par un fil, légèrement écarté de sa position d'équilibre et abandonné à lui-même. C'est aussi le mouvement d'un balancier, volant doué de masse et ramené à une position par un ressort spirale.

Dans beaucoup de cas, la tension donnée par une source alternative a une loi de variation au cours du temps qui est la même que celle régissant l'élongation de l'ombre P' par rapport à l'ombre fixe O' de la figure 16. On dit alors que la tension alternative est « sinusoïdale ». C'est, à peu de choses près, le cas de celle qui nous est fournie par l'E.D.F.

Dans le cas de la tension du secteur, fournie par l'E.D.F., la fréquence est F = 50 Hz (50 périodes par secondes). La période T est donc de 0,02 s (soit 1/50 de seconde). La pulsation ω est de 2 x π x 50 = 314 (on la compte en « radians par seconde »).

Prenons donc une tension alternative sinusoïdale, de fréquence assez élevée, et appliquons-la aux bornes d'un résisteur R. Ce dernier va chauffer par suite de l'effet Joule, mais la chaleur dégagée ne sera pas la même pendant chaque tranche d'une microseconde (par exemple), ainsi qu'on le voit sur la figure 17.

La courbe (1) indique la variation de la tension au cours du temps, variant entre −A et +A.

L'intensité qui passe dans le résisteur varie (courbe 2) de −A/R à +A/R suivant la même loi « sinusoïdale » que la tension. Si nous multiplions à chaque instant la tension par l'intensité, nous obtiendrons la courbe (3), donnant à chaque instant la puissance dissipée dans le résisteur. Cette dernière courbe nécessite quelques explications.

Au temps zéro, la tension est nulle mais croît, l'intensité en fait autant : la puissance va donc partir d'une valeur nulle et croître.

Au bout d'un quart de période, c'est à dire au temps $t_1 = T/4$, la tension et l'intensité, toutes deux positives, passent ensemble par un maximum, qui est A pour la tension et A/R pour l'intensité. La puissance passe donc, elle aussi, par un maximum égal à :

$$A \times A/R = A^2/R$$

Comme la tension et l'intensité décroissent à partir du temps t_1, il en ira de même pour la puissance, qui va arriver à zéro au temps

$$t_2 = \frac{T}{2}$$

Au-delà de cet instant, les choses sont un peu plus complexes. En effet, la tension devient négative, mais l'intensité en fait autant. Le produit de ces deux grandeurs va donc être **positif.** Donc, au temps t_2, la puissance

(Suite page 140)

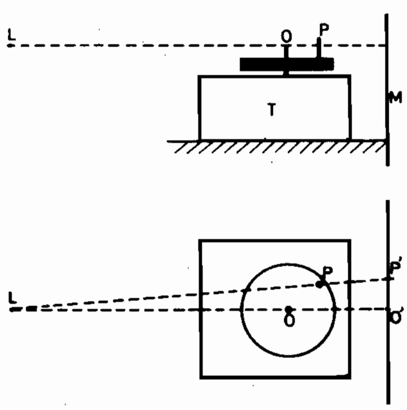

Fig. 16. – Une bonne façon de figurer une variation sinusoïdale est de considérer le mouvement de l'ombre P' d'un objet posé sur le plateau d'un tourne-disque T, le tout étant éclairé par une lampe L située assez loin, la direction joignant la lampe L et l'axe O du plateau étant perpendiculaire au mur M sur lequel se projettent les ombres. La lampe est assez loin du mur pour que l'on puisse considérer les rayons de cette lampe comme parallèles au niveau de P et du mur.

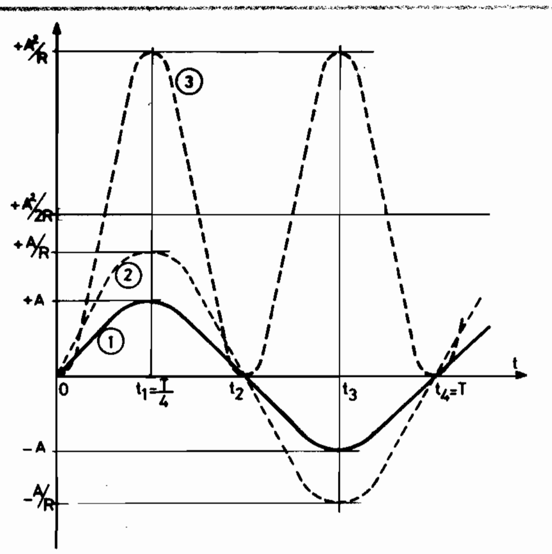

Fig. 17. – Quand une tension alternative fournit une tension variant de + A à – A, si on la fait débiter dans une résistance R, le courant varie de + A / R à –A / R. En faisant le produit de la tension par le courant, on obtient la puissance (courbe 3) qui varie suivant une loi également sinusoïdale (à fréquence double) de 0 à A2 / R. La valeur moyenne de cette puissance est donc A2 / 2R, ce qui correspond à la puissance dissipée dans la même résistance par une tension continue de valeur constante A / $\sqrt{2}$: c'est ainsi que l'on définit la valeur « efficace » d'une tension alternative.

 (Suite de la page 121)

passe par un minimum, et, contrairement à la tension, elle va recommencer à croître.

Au temps

$$t_3 = \frac{3\,T}{2}$$

la puissance repasse par son maximum A^2/R, puis elle décroît de nouveau jusqu'à zéro, valeur atteinte au temps $t_4 = T$.

Sur la courbe (3), on voit donc que la variation de la puissance au cours du temps a une **fréquence double** de celle de la tension et du courant. Par exemple dans le cas du secteur, la puissance passe par son maximum 100 fois par seconde.

On pourrait démontrer que la courbe (3) est aussi une sinusoïde. Pour ceux que cela intéresse, on utilise la formule de trigonométrie bien connue :

$$\sin^2 a = \frac{1 - \cos 2a}{2}$$

La puissance varie donc suivant cette loi, passant par des minima nuls et des maxima égaux à A^2/R.

Au bout d'un grand nombre de périodes, si l'on considère la quantité totale de chaleur dégagée, tout se passe comme si cette puissance était restée constamment égale à sa valeur moyenne, moyenne de ses maxima et de ses minima, soit

$$\frac{1}{2}\frac{A^2}{R} \text{ ou } A^2/2\,R$$

En particulier, si l'on fait passer le courant dans un résisteur dont l'inertie thermique est grande, il prendra une température qui va fluctuer légèrement autour de celle qu'il aurait prise si l'on avait envoyé dans ce même résisteur une puissance constante $A^2/2\,R$. S'il s'agit d'une ampoule à incandescende, elle donnera la même lumière (à part une légère fluctuation) que si on lui appliquait en permanence la puissance $A^2/2\,R$.

Nous sommes presque au bout de nos peines. Cherchons maintenant quelle est la tension continue U que l'on devrait appliquer à ce même résisteur R pour y faire dissiper la puissance $A^2/2\,R$.

On sait qu'une telle tension provoque la dissipation dans le résisteur d'une puissance U^2/R.

On veut donc que : $U^2/R = A^2/2R$, ce qui donne :

$$U^2 = A^2/2$$

Si l'on extrait la racine carrée des deux membres, on trouve enfin :

$$U = A\,/\,\sqrt{2}$$

C'est cette valeur U que l'on appelle la « tension efficace » de la source alternative. C'est la tension continue que l'on doit appliquer à la même ampoule à incandescence que la tension alternative pour obtenir, à la légère fluctuation près lors de l'emploi de l'alternatif, la même puissance lumineuse.

Par exemple, une tension alternative qui varie suivant une loi sinusoïdale entre un maximum +40 V et un minimum −40 V aura une valeur efficace de $40\,/\,\sqrt{2} = 28{,}28$ V.

Comme autre exemple, nous pouvons citer une source dont la tension varie suivant une loi sinusoïdale entre +311,13 et −311,13 V. Sa tension efficace sera :

$$311{,}13\,/\,\sqrt{2} = 220 \text{ V}.$$

Ainsi, lorsque l'on applique le 220 V alternatif à une ampoule donnée, la température de son filament varie bien au cours du temps (assez peu, d'ailleurs, le filament ayant trop d'inertie thermique pour se refroidir notablement en un centième de seconde) puisque la tension appliquée peut descendre jusqu'à zéro et monter jusqu'à 311,13 V, mais cette température est, en moyenne, la même que si l'on avait appliqué à cette même ampoule une tension continue de 220 V.

On désigne souvent cette tension efficace par les lettres « RMS », d'origine anglaise, qui signifiaient « Root Mean Square » (racine carrée de la valeur moyenne du carré).

Précisons bien que ce rapport $\sqrt{2}$ (soit environ 1,41) entre la valeur maximale et la valeur efficace n'existe que dans le cas d'une tension à variation sinusoïdale. Si la tension alternative avait une loi de variation autre que sinusoïdale, le rapport entre la valeur efficace et la valeur de crête ne serait plus $1\,/\,\sqrt{2}$.

EST-CE TOUT ?

Bien sûr, il y aurait encore énormément de choses à dire à propos de l'induction, en particulier le fait que, dans la figure 10, si la variation de courant B_1 induit une tension dans B_2, elle doit en induire aussi dans... B_1 elle-même ; après tout « charité bien ordonnée... » mais nous y reviendrons.