EURELEC

THEORIE

COURS DE BASE
ELECTRONIQUE

1 - L'IMPEDANCE ELECTRIQUE

Dans cette leçon,nous étudierons d'abord les bobines qui, contrairement à celles que nous avons étudiées dans la leçon précédente, offrent une résistance assez élevée qui ne peut plus être négligée : ce sont celles dont l'enroulement est constitué par de nombreuses spires d'un fil de petite section.

Le courant continu, quand il parcourt une bobine de ce type, ne rencontre que l'obstacle dû à la résistance de l'enroulement ; le courant alternatif, au contraire, rencontre non seulement cette résistance mais également l'obstacle dû à la *réactance* inductive.

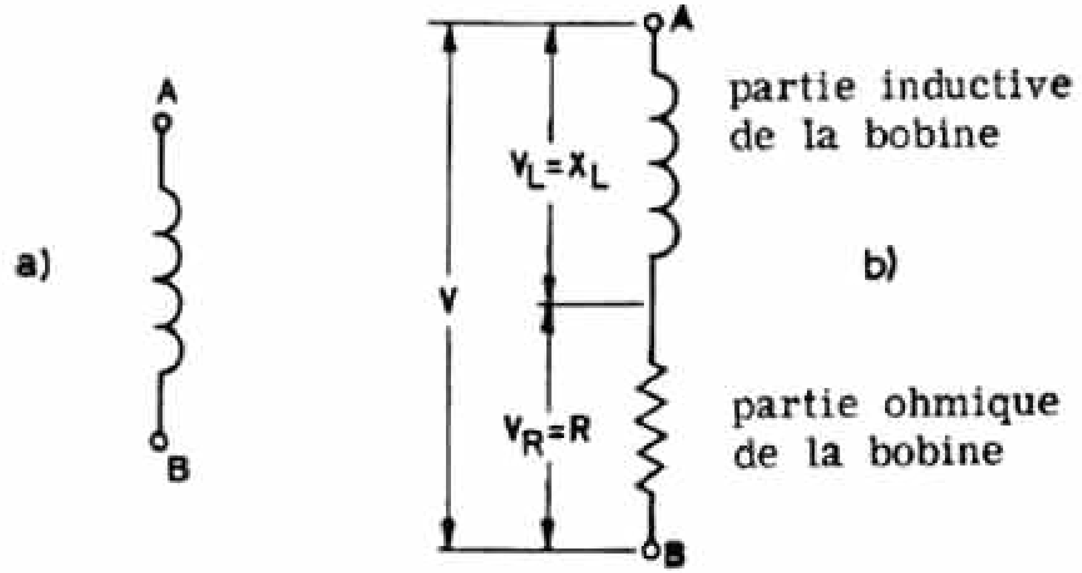
Avec un courant alternatif,cet élément se comporte donc comme une bobine et comme une résistance, et il nous faut donc étudier sa partie inductive séparément de sa partie ohmique.

Pour établir une nette distinction entre ces deux parties, représentons la bobine avec résistance d'une façon différente de celle que nous avons utilisée jusque là pour les bobines sans résistance ; pour ces dernières,nous avions adopté dans les leçons précédentes le symbole graphique de la *figure 1 - a*, tandis que pour les bobines avec résistance nous nous servons maintenant de la représentation de la *figure 1 - b*.

Sur cette représentation,nous indiquons la partie inductive au moyen du même symbole graphique que celui dont nous nous sommes déjà servis pour la bobine sans résistance, tandis que nous indiquons la partie ohmique au moyen d'une résistance reliée en série à la partie inductive.

De cette façon nous supposons que le fil qui constitue l'enroulement n'a pas de résistance, et que la résistance présentée en réalité par la bobine est due à la résistance reliée en série à l'enroulement lui-même.

Ainsi, on doit considérer comme extrémités de la bobine avec résistance les points indiqués par A et B sur la *figure 1 - b*, car entre ces points nous trouvons la même inductance et la même résistance que celle présentée par la bobine.



REPRESENTATION D'UNE BOBINE SANS RESISTANCE ET AVEC RESISTANCE

Figure 1

Nous voyons maintenant que, si l'enroulement n'avait pas de résistance, c'est-à-dire s'il n'y avait pas de partie ohmique dans la bobine, il suffirait pour faire circuler un courant alternatif qui ait, par exemple, une valeur efficace de 1 A, d'appliquer à la partie inductive la tension indiquée par V_L sur la *figure 1 - b*. Dans la leçon précédente, nous avons appris que la valeur efficace de cette tension s'obtient en multipliant la réactance inductive par la valeur efficace du courant, mais comme cette valeur est de 1 A, la tension est donc égale à la réactance X_L, indiquée également sur la *figure 1 - b*.

En réalité l'enroulement offre lui aussi une résistance, et par conséquent, pour le faire parcourir par le courant dont on vient de parler, il faut appliquer à la partie ohmique de la bobine, la tension indiquée par V_R sur la *figure 1 - b*. La valeur efficace de cette tension s'obtient en multipliant la résistance par la valeur efficace du courant, mais comme cette valeur est de 1 A la tension est donc égale à la résistance R, comme c'est indiqué également sur la *figure 1 - b*.

On pourrait donc penser qu'entre les extrémités A et B de la bobine avec résistance il faut appliquer une tension (indiquée par V sur la *figure 1 - b*) dont la valeur efficace est donnée par la somme des valeurs efficaces des tensions V_L et V_R nécessaires pour la partie inductive et pour la partie ohmique. Mais il n'en est pas ainsi car *les tensions V_L et V_R n'ont pas la même phase par rapport au courant*, comme nous pouvons le voir sur la *figure 2.*

Sur la *figure 2 - a* sont représentés deux cycles du courant au moyen de deux sinusoïdes, la deuxième étant dessinée en trait fort pour la distinguer de la première.

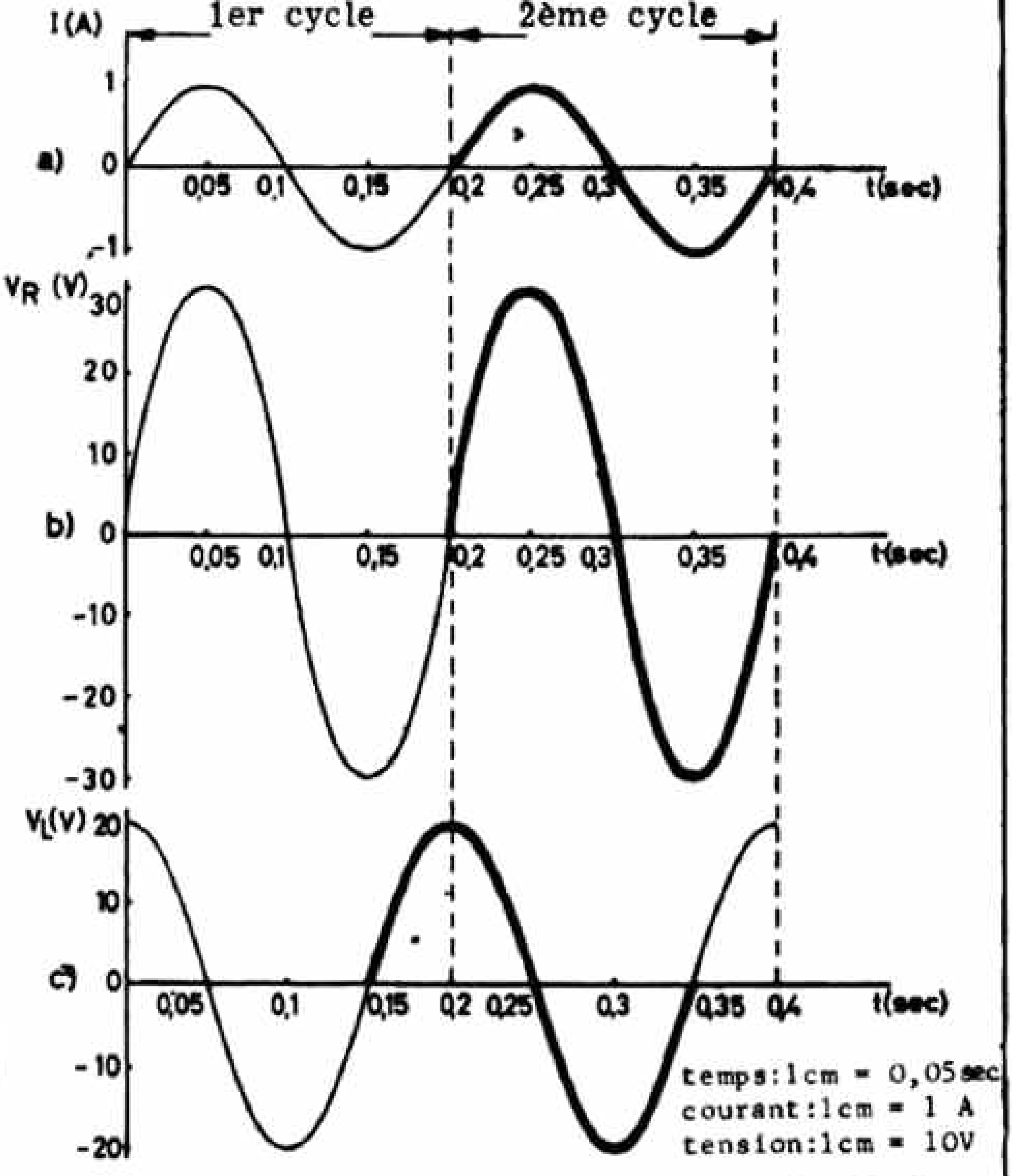
La tension V_R nécessaire pour la partie ohmique de la bobine est représentée, elle, sur la *figure 2 - b,* également au moyen de deux sinusoïdes dont la deuxième est tracée en trait fort : de cette façon on voit clairement que la tension V_R est en phase avec le courant, car les sinusoïdes qui représentent ces deux grandeurs commencent et se terminent aux mêmes instants.

Sur la *figure 2 - c* sont indiqués deux cycles de la tension V_L nécessaire pour la partie inductive de la bobine : chacun de ces deux cycles a la même allure que celle déjà observée dans la leçon précédente, pour la tension nécessaire à une bobine sans résistance.

Une sinusoïde complète a, là encore, été mise en évidence, en la dessinant en trait fort : nous voyons ainsi que la tension V_L est déphasée en avance d'un quart de période par rapport au courant, car la sinusoïde en trait fort commence et se termine effectivement un quart de période avant la sinusoïde en trait fort relative au courant.

Ce fait a déjà été noté dans la leçon précédente, mais ce qui nous intéresse maintenant c'est qu'on a encore le même déphasage par rapport à la tension V_R puisque cette tension est en phase avec le courant et qu'elle a donc la même forme : nous trouvons ainsi que *la tension V_L nécessaire à la partie inductive de la bobine est déphasée en avance d'un quart de période par rapport à la tension V_R nécessaire à la partie ohmique de cette même bobine.*

Par suite de ce déphasage, à l'instant où l'une des deux tensions atteint la valeur maximum, l'autre atteint la valeur zéro et vice versa ; en effet, en comparant les *figures 2 - b* et *2 - c* on s'aperçoit, par exemple, qu'au temps de 0 sec correspondent une tension V_R nulle et une tension V_L maximum ; au contraire, au temps de 0,05 sec correspondent une tension V_L nulle et une tension V_R maximum.



COURANT ET TENSIOI RELATIFS A UNE BOBINE AVEC RESISTANCE

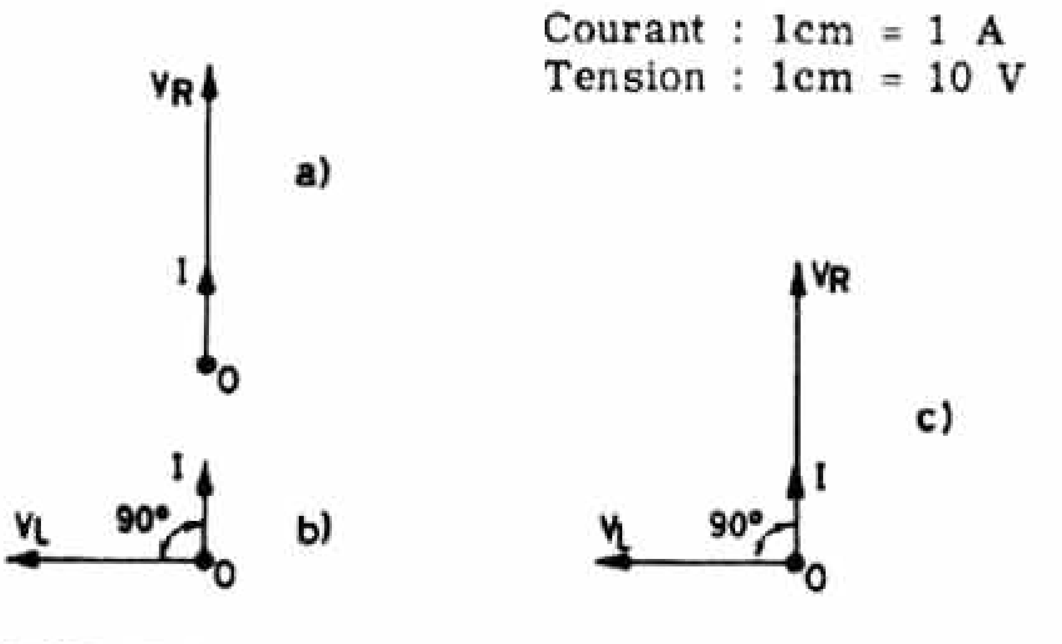
Figure 2

Au temps de 0 sec la tension V appliquée entre les extrémités A et B de la bobine avec résistance est donc égale à la valeur maximum de la seule tension V_L puisque la tension V_R est nulle ; au temps de 0,05 sec la tension V est au contraire égale à la valeur maximum de la seule tension V_R puisque la tension V_L est nulle.

Nous pouvons donc en déduire que la valeur maximum de la tension V n'est pas égale à la somme des valeurs maxima des tensions V_L et V_R car ces valeurs sont atteintes en des instants différents.

Puisque ce fait est dû au déphasage qui existe entre les tensions V_L et V_R, il faut pour trouver la tension V avoir recours à la représentation vectorielle, qui permet précisément de mettre clairement en évidence les déphasages, dont on doit nécessairement tenir compte.

Les *figures 3 - a* et *3 - b* représentent vectoriellement les tensions V_R et V_L et le courant de la *figure 2* ; ces représentations sont les mêmes que celles que nous avons vues dans la Théorie n°9 pour le circuit ohmique et pour le circuit inductif.



REPRESENTATION VECTORIELLE DU COURANT ET DES TENSIONS RELATIVES A UNE BOBINE AVEC RESISTANCE

Figure 3

Dans ce cas pourtant, le courant est le même pour la partie inductive et pour la partie ohmique de la bobine, car ces deux parties sont reliées en série : nous voyons en effet que sur les deux figures le courant est représenté au moyen de vecteurs de même longueur et dirigés dans le même sens.

Nous pouvons donc dessiner ces deux représentations vectorielles superposées de manière à ce que les vecteurs qui représentent le même courant coïncident, comme sur la *figure 3 - c,* en réunissant ainsi sur une seule figure toutes les grandeurs relatives à la bobine avec résistance.

Nous vous proposons maintenant de trouver le vecteur qui représente la tension V que l'on doit appliquer aux extrémités A et B de cette bobine : pour cela rappelons-nous que, comme nous l'avons vu précédemment, nous ne pouvons pas obtenir la valeur maximum de la tension V en faisant la somme des valeurs maxima des tensions V_L et V_R, car ainsi, on ne tiendrait pas compte du déphasage qui existe entre ces deux tensions.

Par contre, le vecteur qui représente la tension V peut être obtenu en faisant la somme des vecteurs qui représentent les tensions V_L et V_R, justement parce que ces vecteurs n'indiquent pas seulement, grâce à leur longueur la valeur maximum des tensions, mais aussi, grâce à leur direction, le déphasage entre ces mêmes tensions.

On représente très simplement la somme de deux vecteurs en les dessinant l'un à la suite de l'autre, sans changer le sens dans lequel ils sont dirigés afin de ne pas modifier l'angle de déphasage compris entre eux ; ensuite, en unissant les extrémités des deux vecteurs, on obtient le vecteur qui représente leur somme.

Sur la *figure 4 - a,* la somme des deux vecteurs V_L et V_R est ainsi indiquée ; le vecteur V_L est dessiné horizontalement, dirigé vers la gauche car il était disposé de cette façon sur la *figure 3,* tandis que le vecteur V_R est dessiné à la suite du premier et dirigé verticalement vers le haut, car il était disposé ainsi sur la *figure 3.*

Avec ce procédé, on n'a pas modifié l'angle de déphasage compris entre les deux vecteurs ; en effet, il est encore de 90° comme sur la *figure 3 - c.*

En unissant enfin les extrémités O et A des deux vecteurs, on obtient le vecteur indiqué par V et qui représente précisément la tension V qu'il faut appliquer à la bobine avec résistance.

Pour trouver la valeur de cette tension, il suffit de tenir compte du

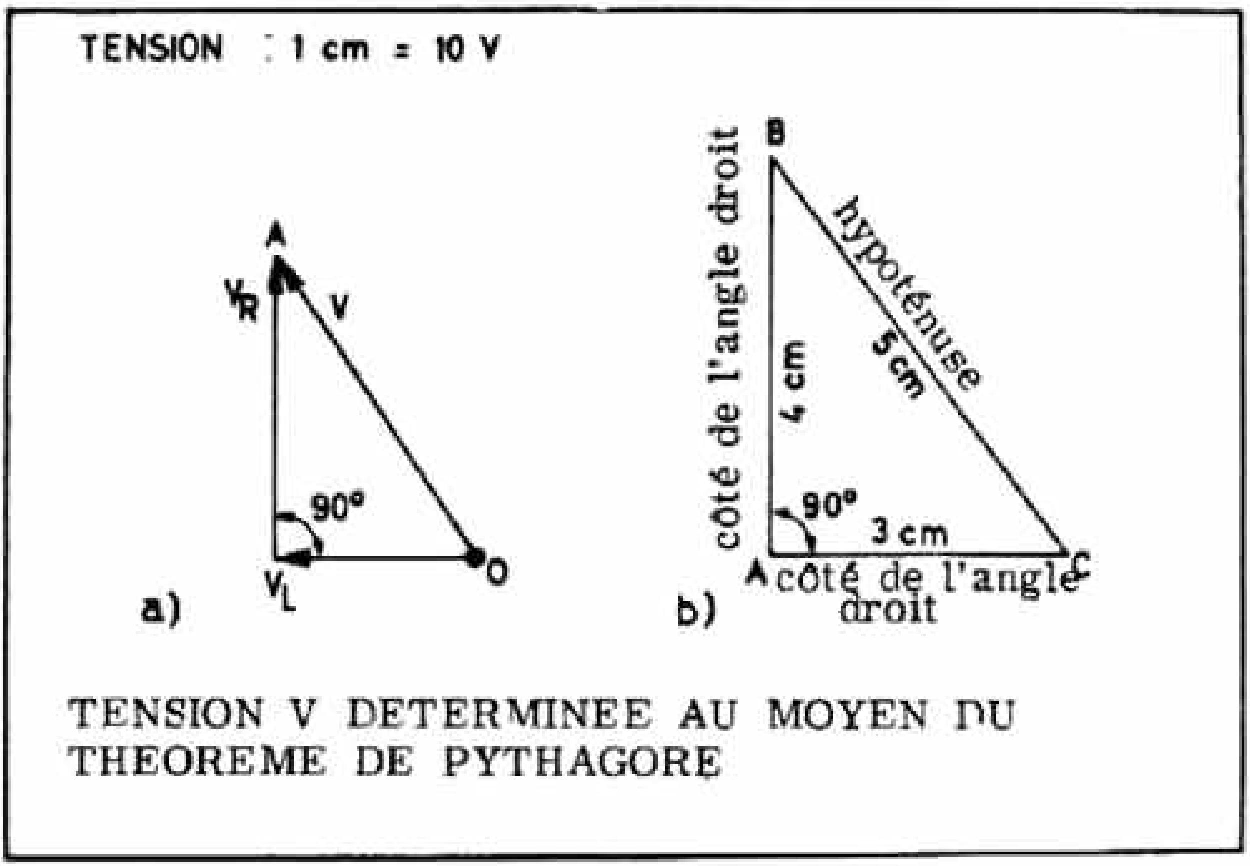


Figure 4

fait que chaque centimètre de longueur d'un vecteur représente 10 V, comme c'est indiqué sur la *figure 4 - a*.

Par exemple, le vecteur V_L long de 2 cm représente une tension de 20 V, tandis que le vecteur V_R long de 3 cm représente une tension de 30 V.

En mesurant sur la figure la longueur du vecteur V nous voyons qu'elle est de 3,6 cm et nous trouvons donc que ce vecteur représente une tension de 36 V ; nous pouvons alors conclure que la tension à appliquer entre les extrémités A et B de la bobine avec résistance pour la faire traverser par un courant de 1 A a la valeur maximum de 36 V.

La valeur maximum de cette tension peut également être obtenue par le calcul, en observant que les trois vecteurs de la *figure 4 - a* forment un triangle rectangle, c'est-à-dire un triangle qui a un angle droit et auquel on peut donc appliquer le théorème de *Pythagore*.

Pour rappeler en quoi consiste ce théorème, étudions le triangle rectangle A B C de la *figure 4 - b*, dont les deux côtés les plus courts AB et AC, entre lesquels l'angle droit est compris, sont appelés *COTES DE L'ANGLE*

DROIT tandis que le troisième côté BC, le plus long, est appelé *HYPOTENUSE.*

Selon le théorème de Pythagore, en faisant le carré des longueurs des côtés de l'angle droit et en les ajoutant, on obtient le carré de la longueur de l'hypoténuse.

Ainsi, sur la *figure 4 - b* le côté AB a une longueur de 4 cm dont le carré est égal à 16, tandis que le côté AC a une longueur de 3 cm, et son carré est égal à 9 ; en faisant la somme de ces deux carrés (9+16=25) on obtient 25, c'est-à-dire un nombre égal au carré de la longueur de l'hypoténuse, qui est effectivement égale à 5 cm.

On peut aussi appliquer le théorème de *Pythagore* au triangle rectangle de la *figure 4 - a* car dans ce cas, plutôt que d'étudier les longueurs des côtés, nous pouvons étudier les tensions que représentent ces longueurs.

Nous pouvons dire qu'en faisant la somme des carrés des tensions V_R et V_L nous obtenons un nombre qui est égal au carré de la tension V.

Puisque la tension V_R a une valeur maximum de 30 V, dont le carré est égal à 900, tandis que la tension V_L a une valeur maximum de 20 V, dont le carré est égal à 400, en faisant la somme de ces carrés (900+400=1300) nous obtenons 1300.

Ce nombre est donc le carré de la valeur maximum de la tension V, valeur que nous pouvons donc déterminer si nous extrayons la racine carrée de ce nombre.

La racine carrée du nombre 1300 est 36,056 ; avec ce procédé nous trouvons donc pour la tension V une valeur maximum pratiquement égale à celle de 36 V obtenue précédemment, étant donné que les 56 millièmes supplémentaires sont négligeables.

Jusqu'à maintenant nous avons étudié les valeurs maxima des tensions car ces valeurs sont indiquées par la représentation vectorielle dont nous nous sommes servis ; en nous souvenant que la valeur maximum d'une tension alternative est égale à 1,41 fois la valeur efficace, nous déduisons que les conclusions auxquelles nous sommes arrivés pour les valeurs maxima sont valables aussi pour les valeurs efficaces des tensions.

Nous pouvons donc dire que *la valeur efficace de la tension que l'on doit appliquer aux extrémités d'une bobine avec résistance est égale à la racine carrée du nombre obtenu en faisant la somme des carrés des valeurs efficaces des tensions nécessaires pour la partie inductive et pour la partie ohmi-*

que de cette bobine.

Jusqu'à maintenant nous avons supposé que la bobine avec résistance était traversée par un courant de 1 A et que, comme nous l'avons déjà dit, la tension V_L était égale à la réactance de la partie inductive de la bobine, tandis que la tension V_R était égale à la résistance de la partie ohmique de cette bobine.

Puisque les tensions V_L et V_R sont égales à l'obstacle opposé au passage du courant par la partie inductive et par la partie ohmique, la tension V, que l'on applique entre les extrémités de la bobine avec résistance, sera égale à son tour à l'obstacle total opposé par cette bobine au passage du courant de 1 A.

Cet obstacle opposé au courant par l'ensemble de la partie inductive et de la partie ohmique de la bobine est appelée *IMPEDANCE ELECTRIQUE* et on l'indique symboliquement par la lettre Z.

L'impédance électrique se mesure en ohm, comme la résistance et la réactance.

La bobine avec résistance est appelée aussi *IMPEDANCE*, justement parce qu'elle a la propriété de présenter une impédance déterminée au passage du courant alternatif.

Du moment que lorsque le courant a une intensité de 1 A, les tensions V, V_L, V_R, sont respectivement égales à l'impédance Z, à la réactance X_L, et à la résistance R, la relation trouvée entre ces trois grandeurs pour les tensions est valable : c'est-à-dire que *le carré de l'impédance est égal à la somme des carrés de la réactance et de la résistance.*

Nous pouvons donc dire que *l'on calcule l'impédance en extrayant la racine carrée du nombre obtenu en faisant la somme des carrés de la réactance et de la résistance.*

Ainsi obtenue par la réactance et la résistance, l'impédance peut permettre, comme on l'a déjà fait pour ces deux grandeurs, l'emploi de la loi d'*Ohm* : autrement dit, de même qu'on applique la loi d'*Ohm* à une résistance ou à une bobine sans résistance, (en étudiant la résistance et la réactance), cette même loi peut s'appliquer à une bobine avec résistance en étudiant son impédance.

La tension nécessaire pour faire traverser un courant alternatif déterminé dans une bobine avec résistance s'obtient en multipliant ce courant par l'impédance présentée par la bobine.

Il ne nous reste plus maintenant qu'à voir quel est le déphasage qui se produit entre cette tension et le courant.

Nous voyons sur la *figure 4 - a* que pour trouver le vecteur V, nous avons dessiné d'abord, horizontalement, le vecteur V_L puis à sa suite et verticalement, le vecteur V_R

Nous aurions pu également suivre le procédé indiqué sur la *figure 5 - a* c'est-à-dire dessiner d'abord, verticalement le vecteur V_R puis à sa suite et horizontalement, le vecteur V_L : en effet, dans ce cas aussi, en unissant les points O et A on obtient un vecteur V égal à celui de la *figure 4 - a*.

Ceci veut dire que le vecteur V peut être trouvé encore d'une troisième façon, en le dessinant directement sur la représentation vectorielle de la *figure 3 - c*, reportée de nouveau sur la *figure 5 - b*.

Cette nouvelle méthode consiste à tracer depuis l'extrémité de chacun des vecteurs V_L et V_R la parallèle à l'autre vecteur : comme on le voit sur la *figure 5 - b*, ces deux parallèles, dessinées en pointillés, se rencontrent au point A, qui uni au point O, permet encore de trouver le vecteur V.

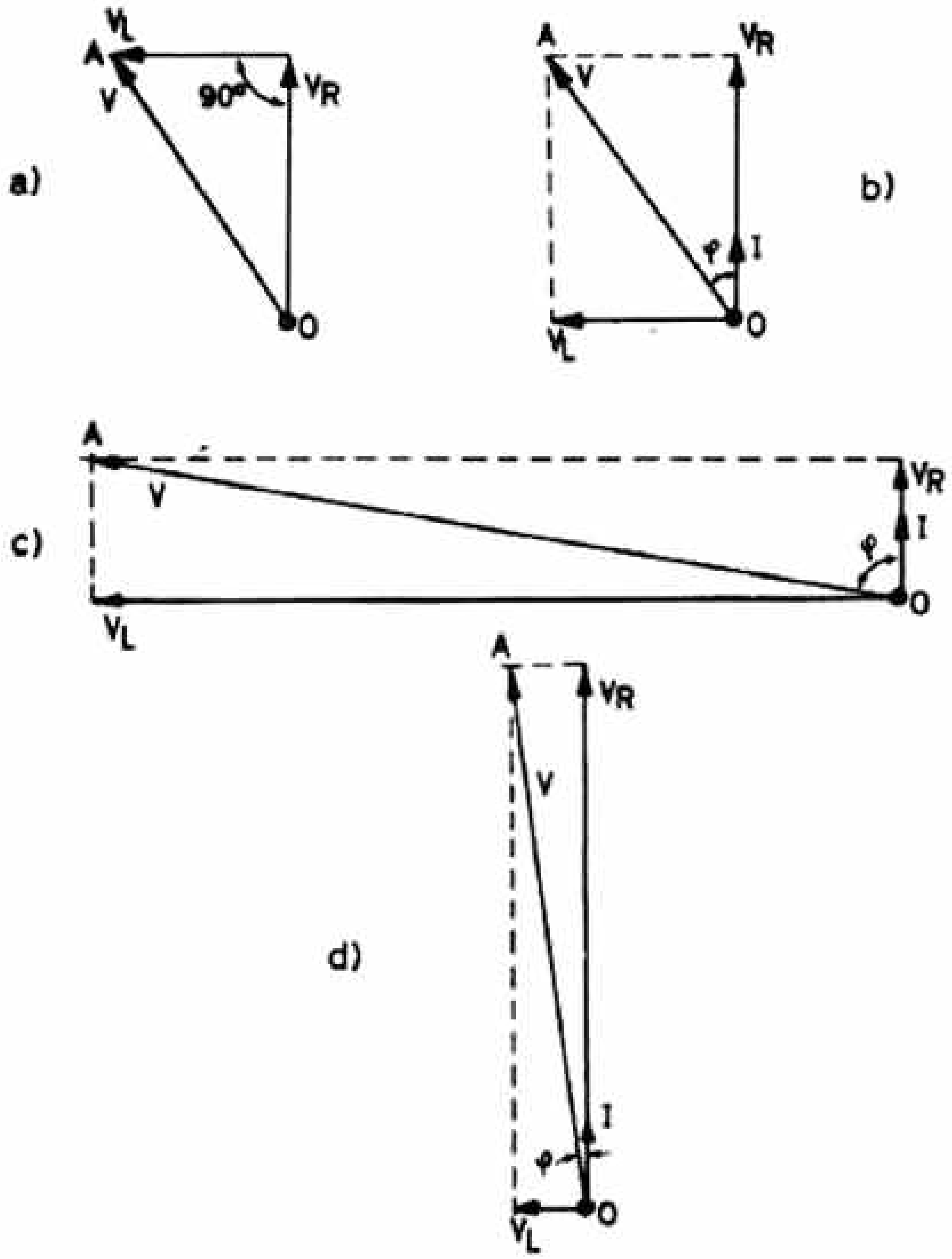
Il est évident que cette méthode découle des précédentes car les vecteurs V et V_L et la ligne de pointillés verticale constituent le même triangle que celui de la *figure 4 - a*, tandis que les vecteurs V et V_R et la ligne de pointillés horizontale constituent le même triangle que celui de la *figure 5 - a*.

Cette nouvelle méthode a pourtant l'avantage, par rapport aux précédentes, de montrer l'angle de déphasage qui existe entre la tension V appliquée aux extrémités de l'impédance et le courant qui parcourt cette impédance ; sur la *figure 5 - b* cet angle a été indiqué par la lettre grecque φ qui se lit "phi" (on utilise maintenant la lettre φ minuscule, tandis que dans les leçons précédentes on a utilisé la lettre Φ majuscule pour indiquer le flux d'induction).

La tension V est encore déphasée en avance sur le courant I, comme dans le cas d'une bobine sans résistance, mais maintenant l'avance est inférieure à un quart de période, car l'angle φ est inférieur à 90°.

Cela signifie que l'*impédance est un élément aux caractéristiques intermédiaires entre celles d'une résistance pour laquelle l'angle de déphasage est nul, et celle d'une bobine, pour laquelle l'angle de déphasage est de 90°*.

L'angle de déphasage dépend donc de l'inductance et de la résistance présentées par l'impédance.



DEPHASAGE ENTRE LA TENSION ET LE COURANT RELATIFS A UNE BOBINE AVEC RESISTANCE

Figure 5

Si l'inductance est beaucoup plus grande que la résistance, la tension V_L nécessaire à la partie inductive est également plus grande que la tension V_R nécessaire à la partie ohmique. Dans la représentation vectorielle, comme on le voit sur la *figure 5 - c*, le vecteur V_L est donc beaucoup plus long que le vecteur V_R : par conséquent le vecteur V que l'on obtient forme avec le vecteur I un angle φ peu inférieur à 90°. Dans ce cas l'impédance se comporte presque comme une bobine.

Si au contraire, la résistance est beaucoup plus grande que l'inductance, c'est à la tension V_R à être représentée au moyen d'un vecteur plus long que celui qui représente la tension V_L ; par conséquent, comme on le voit sur la *figure 5 - d*, le vecteur V forme avec le vecteur I un angle beaucoup plus petit. L'impédance se comporte donc maintenant presque comme une résistance.

En électronique on utilise généralement des bobinages qui ont une inductance aussi élevée que possible par rapport à leur résistance ; voyons comment s'obtient ceci.

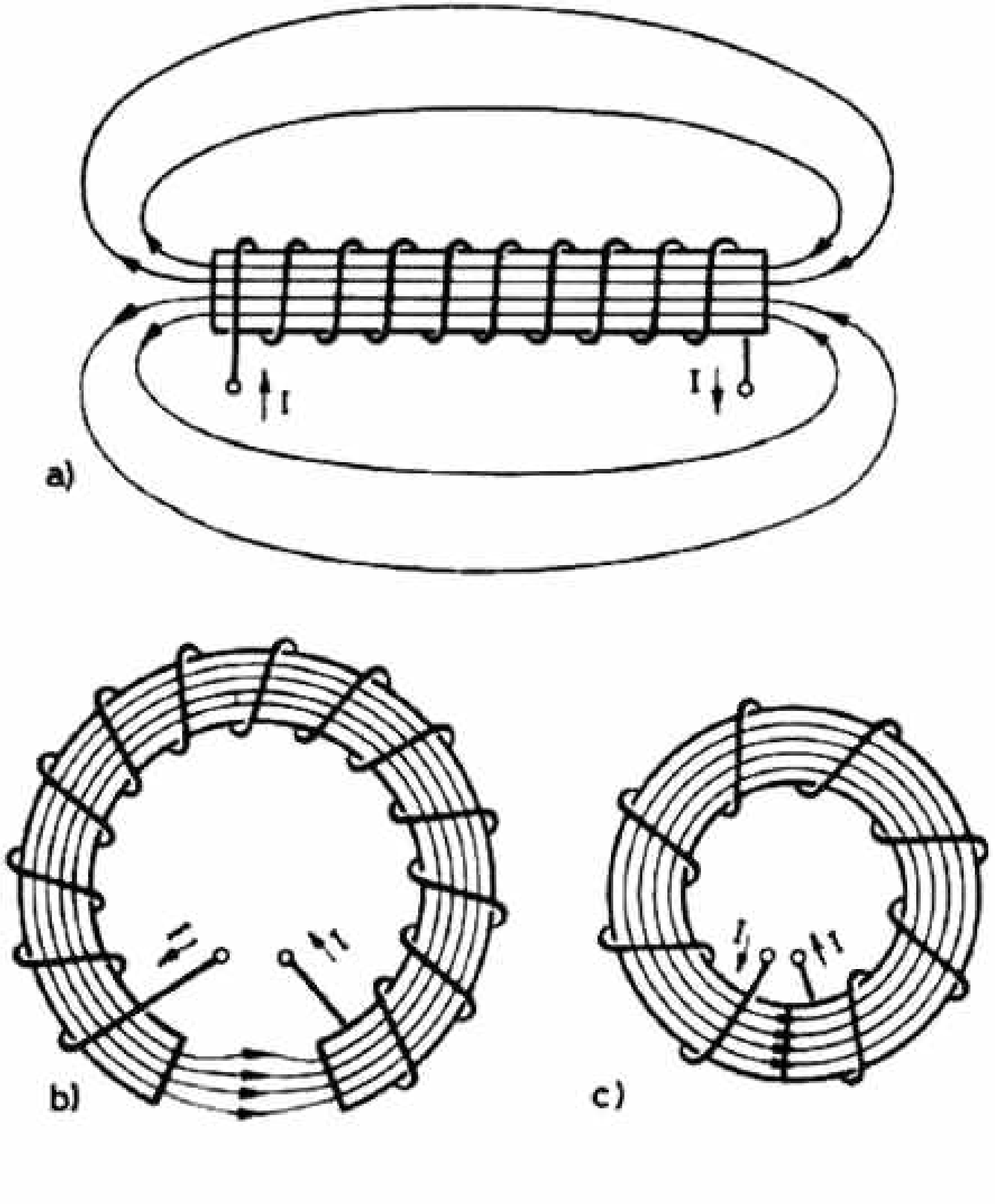
2 - CIRCUITS MAGNETIQUES

Pour obtenir un bobinage d'une inductance élevée par rapport à sa résistance, on munit celui-ci d'un noyau ferro-magnétique.

Souvenons-nous en effet de tout ce qui a été dit dans la leçon sur le magnétisme, c'est-à-dire que l'inductance d'une bobine dépend de la matière située à l'intérieur. Ainsi en remplaçant l'air par la matière ferro-magnétique d'un noyau, on constate une augmentation sensible de l'inductance, alors que la résistance ne subit pas de variation car elle est due au fil qui constitue l'enroulement.

Pour obtenir une inductance appréciable il faut utiliser un *noyau fermé*. On a déjà parlé de ce noyau dans la leçon sur le magnétisme, en observant simplement qu'il devait être disposé de façon à ce que les lignes d'induction le traversent entièrement ; maintenant il nous faut voir de manière plus précise quelle doit être sa forme.

Dans ce but nous allons d'abord étudier une bobine munie d'un noyau



TRANSFORMATION D'UN NOYAU OUVERT EN UN NOYAU FERME

Figure 6

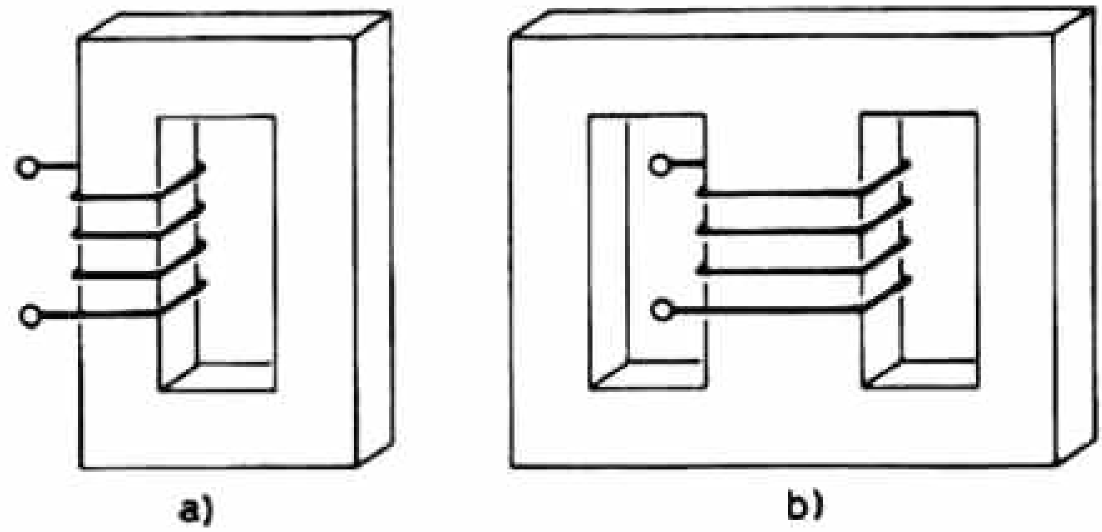
disposé seulement à l'intérieur : comme on le voit sur la *figure 6 - a*, les lignes d'induction qui sortent par une extrémité du noyau se ferment dans l'air et entrent à nouveau dans le noyau par son autre extrémité.

Nous vous rappelons que ce type de noyau a été appelé "ouvert" précisément parce que les lignes d'induction ne se ferment pas entièrement en lui, mais traversent également l'air.

Pour transformer ce noyau ouvert en noyau fermé, nous pouvons imaginer qu'on le plie, comme sur la *figure 6 - b* ; au fur et à mesure que les deux extrémités du noyau se rapprochent, l'espace d'air a travers lequel se ferment les lignes d'induction se rétrécit jusqu'à s'annuler complètement quand les extrémités se rejoignent, comme sur la *figure 6 - c*.

On a ainsi obtenu un noyau fermé traversé par tout le flux d'induction produit par la bobine, car dans ce cas aucune ligne d'induction ne se ferme dans l'air ; *l'inductance qui en résulte est égale à celle de la bobine sans noyau multipliée par la perméabilité relative à l'air du matériau qui constitue le noyau ferro-magnétique.*

Pour des raisons de construction, les noyaux utilisés dans la pratique n'ont pas la forme de la *figure 6 - c*, mais celle de la *figure 7* ; le type de



TYPES LES PLUS COURANTS DE NOYAUX FERMES

Figure 7

noyau de la *figure 7 - a* est appelé à *COLONNE* tandis que le type de la *figure 7 - b* est appelé à *CUIRASSE* ou en *E I*, et c'est le plus utilisé.

Sur cette figure nous devons également remarquer que l'enroulement n'est plus disposé tout le long du noyau, comme sur la *figure 6 - c*, mais seulement autour d'un certain tronçon rectiligne ; cette disposition différente est due à la nécessité de simplifier et de rendre plus rapide la construction de l'enroulement.

De cette façon en effet l'enroulement peut être effectué à part sur une bobine de carton spéciale qui est ensuite enfilée sur le noyau, lequel est décomposable en ses divers tronçons rectilignes. Nous reviendrons sur les particularités de construction de ces bobines dans les prochaines leçons.

Maintenant il est important d'observer que, bien que l'enroulement soit disposé autour d'un tronçon limité du noyau, le flux d'induction se ferme encore en grande partie à l'intérieur du noyau, comme on le voit sur la *figure 8 - a* et sur la *figure 8 - b* ; en effet seules quelques lignes d'induction, dessinées en pointillés, sortent du noyau et se ferment dans l'air.

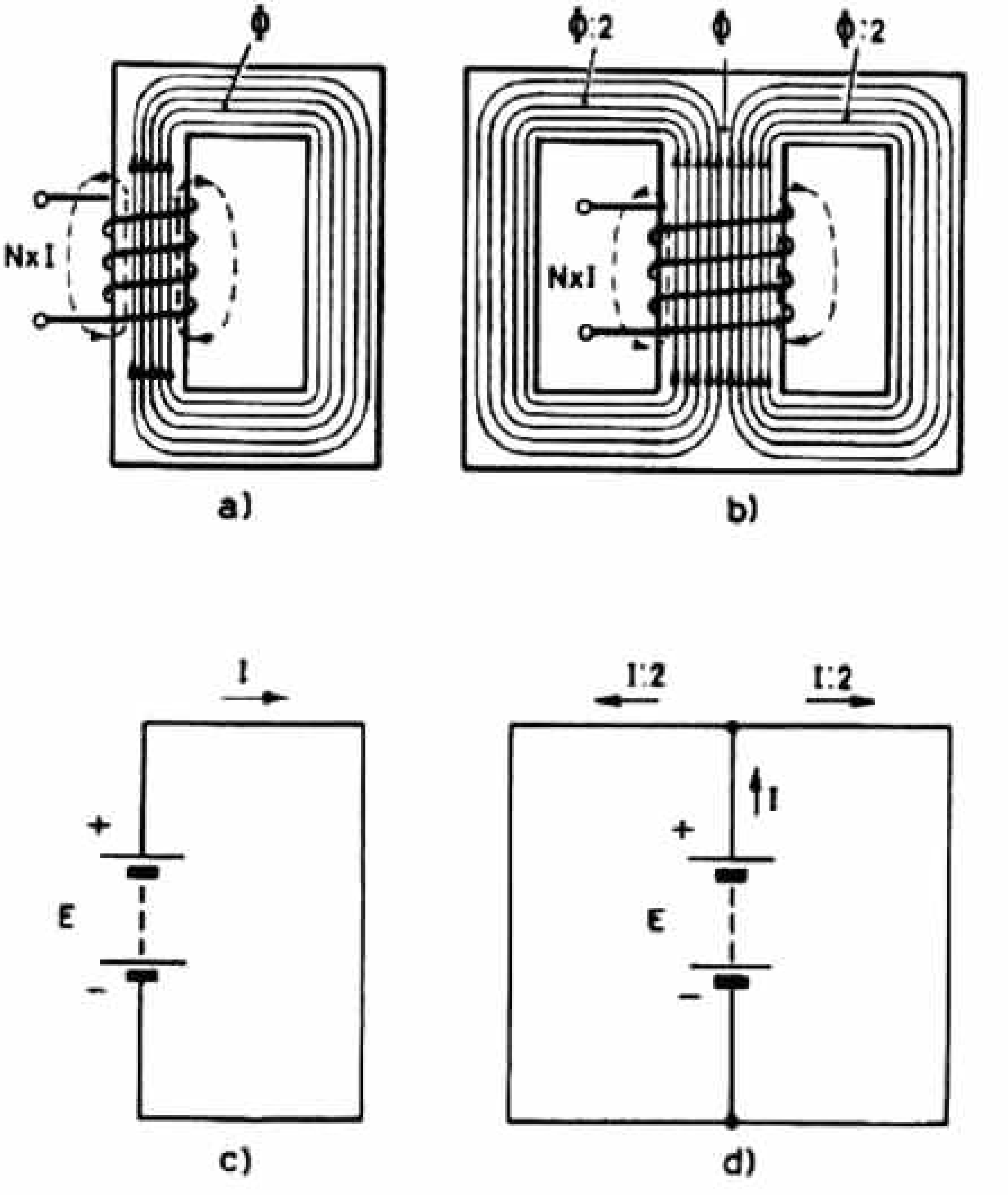
Nous pouvons expliquer ce fait en rappelant que l'on a imaginé que le noyau était constitué par des petits aimants élémentaires s'orientant selon les lignes de force du champ magnétique produit par l'enroulement parcouru par le courant.

Dans ce cas l'orientation ne se limite pas aux petits aimants du tronçon de noyau autour duquel est disposé l'enroulement, car ces petits aimants orientent à leur tour les petits aimants des autres tronçons du noyau ; l'aimantation s'étend ainsi à tout le noyau, qui est par conséquent entièrement traversé par les lignes d'induction.

A l'extérieur du noyau les lignes d'induction sont beaucoup moins nombreuses car l'air, comme nous le savons, s'aimante moins facilement que la matière ferro-magnétique.

Puisque les lignes d'induction passent en majeure partie à l'intérieur du noyau, nous disons que le noyau est plus PERMEABLE que l'air aux lignes d'induction, c'est-à-dire qu'il est plus facilement traversé par ces lignes.

Pour plus de clarté, nous pouvons comparer le noyau à un terrain perméable à l'eau, et l'air qui environne le noyau à un terrain presque imperméable entourant le premier. L'eau qui coule sur ces terrains est évidemment absorbée en grande partie par le terrain perméable, à travers lequel elle peut



ANALOGIE ENTRE LES CIRCUITS MAGNETIQUES FERMES ET LES CIRCUITS ELECTRIQUES

Figure 8

s'infiltrer plus facilement ; comme l'eau, le flux d'induction suit la voie qu'il peut traverser le plus facilement, c'est-à-dire le noyau.

Nous comprenons ainsi pourquoi dans les leçons précédentes, nous avons utilisé le terme de "*perméabilité magnétique*". Dans ces leçons on a dit par exemple que la perméabilité relative à l'air indique de combien augmente l'inductance d'une bobine quand on remplace l'air par un noyau fermé ; nous savons maintenant que ce noyau détermine une augmentation de l'inductance en donnant lieu à un flux d'induction plus grand, justement parce qu'il peut être traversé plus facilement que l'air par les lignes d'induction, c'est-à-dire parce qu'il est plus perméable que l'air.

Tout ceci nous fait comprendre pourquoi, avec l'emploi d'un noyau ferro-magnétique on obtient deux avantages : en effet, non seulement cela augmente considérablement le flux d'induction et par suite l'inductance, mais encore cela permet d'établir un parcours forcé pour la plus grande partie des lignes d'induction, en fixant la forme voulue pour le noyau dans lequel passent ces lignes.

Seules les lignes d'induction qui se ferment dans l'air ne peuvent être dirigées avec les autres selon le parcours constitué par le noyau ; l'ensemble de ces lignes est donc appelé *FLUX DE DISPERSION*.

Dorénavant nous négligerons le flux de dispersion, qui est en général réduit et nous ne tiendrons compte que du flux beaucoup plus important qui traverse le noyau.

Ainsi le noyau peut être considéré comme un circuit fermé pour le flux d'induction qui le traverse entièrement, comme cela se produit pour un circuit électrique parcouru dans toute sa longueur par le courant.

Notons maintenant que, de même que le courant qui circule dans un circuit électrique est dû à un générateur inséré dans le circuit, de même le flux d'induction qui traverse un noyau est dû à l'enroulement parcouru par un courant et disposé autour du noyau.

Rappelons-nous d'autre part que, dans les leçons précédentes, pour indiquer le produit du nombre de spires N de l'enroulement par le courant I qui le parcourt (N x I) on a utilisé le terme de "*force magnétomotrice*" (ou tension magnétique), qui est analogue au terme de "*force électromotrice*" (ou tension électrique).

Ces remarques nous montrent qu'un enroulement et son noyau fermé présentent d'étroites analogies avec un circuit électrique ; pour ce motif *l'ensemble constitué par l'enroulement et le noyau est aussi appelé CIRCUIT MAGNETIQUE.*

Pour chaque type de circuit magnétique on peut trouver le circuit électrique correspondant : par exemple, le circuit magnétique de la *figure 8 - a* correspond au circuit électrique de la *figure 8 - c,* que nous supposons constitué par une bobine de résistance non négligeable reliée à une batterie.

Nous pouvons dire en effet que de même que la f.e.m. E fait parcourir le conducteur par un courant I, de même la f.m.m. (force magnétomotrice) N x I fait traverser le noyau par le flux d'induction Φ.

En étudiant le circuit électrique correspondant à un circuit magnétique donné, on peut faciliter l'étude de ce dernier.

Par exemple, au circuit magnétique de la *figure 8 - b* correspond le circuit électrique de la *figure 8 - d,* que nous supposons constitué par deux conducteurs de résistance égale reliés en parallèle à la batterie.

Comme nous le savons, les résistances des deux conducteurs étant égales, le courant I fourni par la batterie se divise en deux courants égaux (indiqués par I : 2 sur la *figure 8 - d*), et chacun des deux circule dans un des conducteurs.

Le flux d'induction devra présenter un comportement analogue.

Dans le circuit magnétique correspondant, en effet, le flux Φ produit par la bobine se divise en deux flux égaux (indiqués par Φ : 2 sur la *figure 8 - b*), et chacun des deux traverse une des portions latérales du noyau.

L'analogie entre circuits magnétique et électrique peut s'étendre davantage ; nous nous rappelons à ce sujet qu'en divisant la f.e.m. par le courant on obtient la résistance présentée par le circuit électrique, conformément à la loi d'*Ohm*.

Donc, si nous divisons la f.m.m. par le flux d'induction, nous trouvons pour le circuit magnétique une grandeur analogue à la résistance du circuit électrique ; cette grandeur est appelée la *RELUCTANCE MAGNETIQUE* du noyau et on l'indique par la lettre $\mathcal{R}$ (écrite différemment de la lettre R que l'on utilise pour indiquer la résistance électrique).

Nous pouvons donc dire que *la résistance magnétique indique le nombre d'ampère-spires nécessaires pour obtenir dans le noyau le flux d'induction de 1 Wb.*

De même que la résistance dépend de la longueur et de la section du conducteur, de même la réluctance magnétique dépend de la longueur et de la section du noyau, c'est-à-dire qu'elle est d'autant plus grande que le noyau est plus long et d'autant plus petite que sa section est plus grande.

La résistance électrique dépend également du matériau qui constitue les conducteurs et dont on tient compte avec la résistivité de ce matériau ; la réluctance magnétique dépend de la matière ferro-magnétique qui constitue le noyau et, dans ce cas, on en tient compte avec la perméabilité absolue de cette matière.

Puisqu'une matière ferro-magnétique est traversée d'autant plus facilement par le flux d'induction que sa perméabilité est plus grande, la réluctance sera d'autant plus petite que la perméabilité du noyau sera plus grande.

En conclusion, on peut dire que *la réluctance d'un circuit magnétique s'obtient en divisant sa longueur par sa section et par la perméabilité absolue du matériau qui constitue le noyau.*

Les circuits magnétiques étudiés jusque là sont aussi appelés *FERMES* car leur noyau est fermé sur lui-même ; il nous faut aussi signaler brièvement les circuits magnétiques appelés *OUVERTS* parce que leur noyau présente une interruption par laquelle les lignes d'induction se ferment dans l'air.

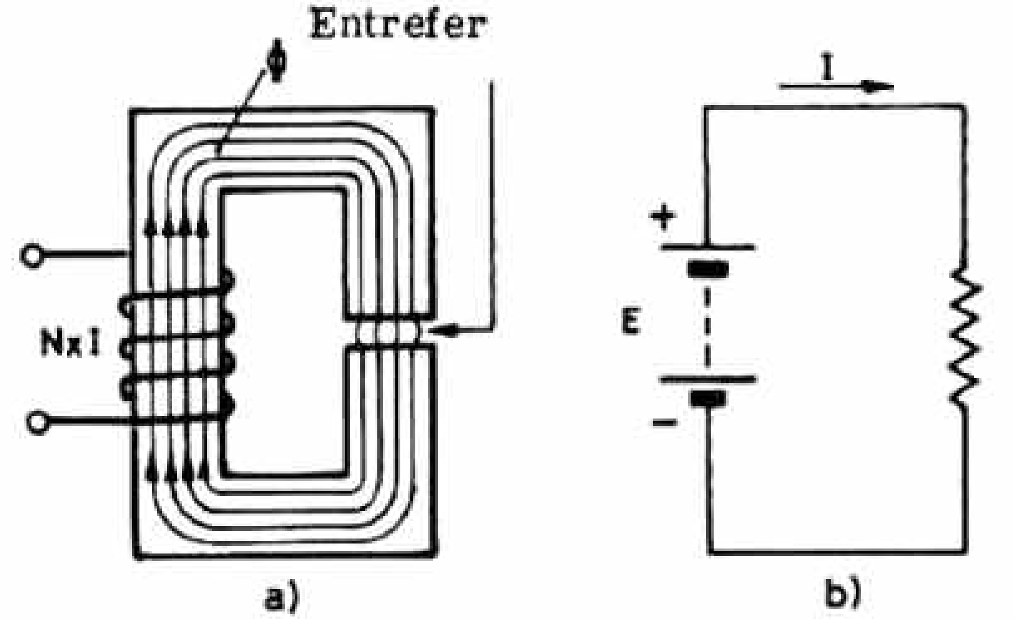
Dans la pratique, l'interruption du noyau, appelée *ENTREFER*, est toujours limitée, comme on le voit par exemple sur la *figure 9 - a.*

Il ressort de ceci que les lignes d'induction qui traversent l'entrefer restent encore approximativement parallèles entre elles, comme dans le noyau et l'on peut donc dire que l'entrefer présente lui aussi au flux d'induction une section à peu près égale à celle du noyau.

Ainsi, quand on connaît la section et la longueur de l'entrefer, ainsi que la perméabilité magnétique de l'air qui s'y trouve, on peut calculer la réluctance présentée par l'entrefer au flux d'induction par le même procédé que celui indiqué précédemment pour le noyau.

On constate ainsi que la *réluctance de l'entrefer est bien supérieure à celle du noyau,* à cause évidemment du fait que la perméabilité de l'air est très inférieure à la perméabilité de la matière ferro-magnétique qui constitue ce noyau.

Un circuit magnétique ouvert est donc analogue à un circuit électrique qui, comme celui de la *figure 9 - b* comprend une résistance d'une valeur



ANALOGIE ENTRE UN CIRCUIT MAGNETIQUE OUVERT ET UN CIRCUIT ELECTRIQUE

Figure 9

bien supérieure à celle des conducteurs qui la relient à la batterie. La valeur de la résistance correspond évidemment à la réluctance de l'entrefer, tandis que la résistance des conducteurs correspond à la réluctance du noyau ferro-magnétique.

De même que la résistance des conducteurs et celle des résistances sont en série et équivalent donc à une résistance unique égale à leur somme, de même la réluctance du noyau et celle de l'entrefer sont en série et par conséquent la réluctance présentée au total par le circuit magnétique ouvert est égale à la somme des réluctances en question.

La f.m.m. nécessaire pour obtenir dans le circuit magnétique ouvert un flux d'induction déterminé s'obtient donc en multipliant ce flux par la somme des réluctances du noyau et de l'entrefer.

Maintenant que nous avons étudié toutes ces analogies entre les circuits électrique et magnétique, il faut mettre en évidence un fait très important qui distingue nettement ces deux types de circuit.

Comme nous le savons, si l'on double, triple, etc... la f.e.m. appliquée à un circuit électrique, on double, triple, etc... de la même façon le courant qui le parcourt. Ceci ne se produit pas pour le circuit magnétique, car à une augmentation de la f.m.m. ne correspond souvent pas une augmentation égale du flux d'induction ; il peut même se produire que, à un certain point, même quand la f.m.m. augmente beaucoup, le flux ne subit plus d'augmentation sensible.

Ce fait est dû à la présence du noyau, et il nous faut donc étudier le comportement du matériau qui le constitue, lorsque la f.m.m. varie.

Pour étudier le comportement d'une matière ferro-magnétique déterminée, on construit un noyau de cette matière autour duquel on place un enroulement dans lequel on envoie un courant d'une intensité de plus en plus grande, de manière à ce que la f.m.m. donnée par le produit N x I, augmente.

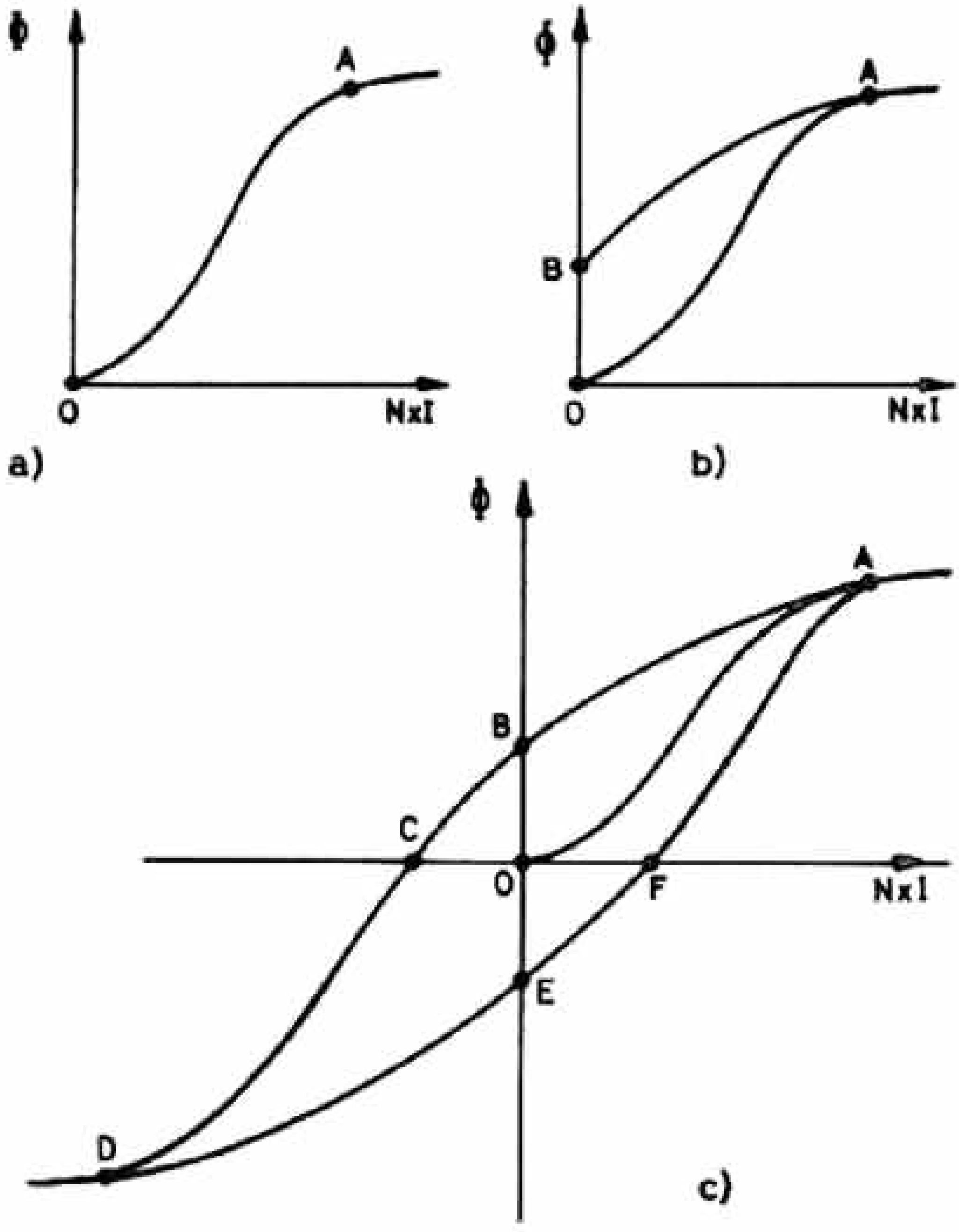
Pour chaque nouvelle valeur prise par le courant on mesure le flux d'induction correspondant obtenu dans le noyau, au moyen d'appareils de mesure spéciaux dont sont dotés les laboratoires dans lesquels se font ces essais.

De cette façon, pour chaque valeur du courant et donc de la f.m.m. N x I, on peut connaître la valeur correspondante du flux d'induction dans le noyau ; pour voir comment varie ce flux quand la f.m.m. varie, on reporte les valeurs trouvées sur un diagramme cartésien, et l'on obtient ainsi les différents points qui, unis entre eux, permettent de tracer la courbe indiquant comment varie le flux d'induction quand la f.m.m. varie.

Le procédé que l'on adopte pour tracer cette courbe est le même que celui que l'on a adopté dans les leçons précédentes pour dessiner la sinusoïde représentant le courant ou la tension alternative, avec la seule différence que, dans ce cas, on reporte sur l'axe horizontal les valeurs de la f.m.m. N x I et sur l'axe vertical les valeurs du flux d'induction Φ

Sur la *figure 10 - a* l'on peut voir la courbe obtenue avec les mesures fournies par une matière ferro-magnétique de type courant. Puisque, maintenant il est moins intéressant de lire les valeurs de la f.m.m. et du flux que de voir comment varient ces grandeurs, on n'a pas reporté ces valeurs sur les axes mais seulement indiqué le sens dans lequel elles augmentent, au moyen des flèches dessinées aux extrémités de ces axes.

Pour savoir comment varie le flux lorsque la f.m.m. augmente, ima-



COURBE DE PREMIERE AIMANTATION ET CYCLE d'HYSTERESIS d'UNE MATIERE FERROMAGNETIQUE

Figure 10

ginons que nous partons du point O, où la f.m.m. comme le flux sont nuls et que nous nous déplaçons vers la droite sur l'axe horizontal. En étudiant la distance entre chaque point de la courbe à l'axe horizontal, distance qui indique précisément la valeur du flux, nous constatons qu'au fur et à mesure que nous nous déplaçons vers la droite sur l'axe horizontal, c'est-à-dire vers des valeurs toujours plus grandes de la f.m.m., la courbe s'éloigne de l'axe horizontal, c'est-à-dire que sa distance à l'axe augmente, d'abord très peu, puis de plus en plus.

Ceci signifie que, lorsque la f.m.m. augmente le flux d'induction augmente également, d'abord peu puis toujours davantage.

Nous voyons pourtant qu'à la droite du point A la courbe est presque parallèle à l'axe horizontal, donc que sa distance à cet axe ne varie presque plus : ceci signifie qu'à partir d'un certain point, même quand la f.m.m. augmente, le flux d'induction obtenu dans le noyau n'augmente pratiquement plus.

Ce phénomène est appelé la *SATURATION MAGNETIQUE* et l'on dit qu'à partir du point A le noyau est *SATURE*.

Nous pouvons expliquer ce comportement en considérant que les petits aimants élémentaires du noyau, bien qu'étant très nombreux, ne sont pas en nombre infini, et que lorsque la f.m.m. atteint une valeur déterminée, tous ces petits aimants sont orientés : il est alors évident que, même quand la f.m.m. augmente, le flux d'induction ne subit plus d'augmentation, car il n'y a plus de petits aimants capables d'être orientés.

La courbe de la *figure 10 - a* est appelée *COURBE DE PREMIERE AIMANTATION* car elle est obtenue quand on aimante pour la première fois une matière ferro-magnétique complètement désaimantée à l'origine ; cette courbe nous montre donc comment dans ces conditions particulières varie le flux d'induction lorsque la f.m.m. augmente ainsi que le courant envoyé dans l'enroulement.

Nous devons pourtant tenir compte du fait que les noyaux de matière ferro-magnétique sont généralement utilisés pour des enroulements alimentés en courant alternatif, lequel augmente et diminue, en inversant son sens de circulation ; il nous faut donc étudier le comportement de la matière lorsque le courant subit ces diverses alternances.

Voyons en premier lieu ce qui se passe lorsque le courant diminue, après avoir atteint une valeur capable de porter le noyau à saturation.

On pourrait penser que, au fur et à mesure que le courant et la f.m.m. diminuent, le flux d'induction diminue en reprenant les mêmes valeurs que celles qu'il avait prises quand la f.m.m. avait augmenté, valeurs qui, dans ce cas, seraient encore indiquées par la distance entre chaque point de la courbe de la *figure 10 - a* à l'axe horizontal.

Au contraire, le flux prend des valeurs différentes indiquées par la distance entre chaque point de la courbe AB de la *figure 10 - b* à l'axe horizontal ; comme cette courbe se trouve au-dessus de la courbe OA, et qu'elle se trouve à une plus grande distance de l'axe horizontal, chaque point indique évidemment un flux d'une valeur plus grande.

Nous observons en particulier que la courbe ne passe pas par le point O correspondant à la f.m.m. nulle : ceci signifie que, même si le courant qui circule dans l'enroulement s'annule complètement il reste dans le noyau une certaine induction appelée *INDUCTION REMANENTE*.

Quand le courant s'est annulé, supposons que l'on change son sens de circulation et que l'on fasse augmenter de nouveau son intensité.

Pour tenir compte du fait que le courant circule maintenant dans l'enroulement dans le sens opposé au précédent, les valeurs de la f.m.m. sont reportées sur le prolongement de l'axe horizontal à gauche du point O, prolongement que l'on voit sur la *figure 10 - c* : les valeurs du flux d'induction sont donc indiquées par la distance entre la courbe et ce prolongement.

Comme on le voit sur la *figure 10 - c* lorsque la f.m.m. augmente de nouveau, la courbe dépasse le point B et coupe le prolongement de l'axe horizontal au point C : en ce point donc, la distance entre la courbe et l'axe s'étant annulée, le flux est égal à zéro.

Nous voyons ainsi que, pour annuler l'induction rémanente, il faut faire circuler dans l'enroulement un courant dirigé en sens contraire de celui qui était utilisé pour aimanter le noyau.

Nous pouvons également dire que le flux d'induction suit les variations du courant alternatif avec un certain retard, car il ne s'annule que lorsque ce courant, après s'être annulé a déjà augmenté en circulant en sens contraire.

Ce phénomène est appelé *HYSTERESIS MAGNETIQUE* car, en Grec antique, le terme "hystérésis" signifie justement retard.

Nous pouvons expliquer l'hystérésis magnétique en étudiant encore les petits aimants élémentaires du noyau ; ces petits aimants étant très nombreux se gênent réciproquement lorsqu'ils doivent tourner autour de leur centre pour s'orienter et emploient donc un certain temps pour se mettre dans la position voulue.

Quand le flux d'induction s'est annulé au point C, si l'on augmente encore la f.m.m. le flux se remet lui aussi à augmenter et ses lignes d'induction sont donc maintenant dirigées en sens contraire du précédent. On tient compte de ce fait en reportant les valeurs du flux sous l'axe horizontal et l'on obtient ainsi la courbe CD.

Au point D on a de nouveau la saturation du noyau, car dans ce cas encore tous les petits aimants élémentaires sont orientés dans la nouvelle direction des lignes d'induction.

En faisant diminuer de nouveau le courant jusqu'à son annulation, on obtient la courbe DE semblable à la courbe AB, et l'on a encore une induction rémanente égale à la précédente.

En inversant ensuite le sens de circulation du courant et en faisant augmenter de nouveau son intensité, on obtient la courbe EFA semblable à la courbe BCD.

La courbe se ferme donc en A et, si le courant et donc la f.m.m., variaient périodiquement entre ces valeurs (comme cela se produit par exemple lorsque l'enroulement est parcouru par un courant alternatif), le flux d'induction reprendrait les mêmes valeurs que celles indiquées par la courbe fermée A-B-C-D-E-F-A, appelée pour cela *CYCLE D'HYSTERESIS* de la matière ferro-magnétique.

Ceci se produit dans le cas des transformateurs d'alimentation, précisément constitués par plusieurs enroulements disposés autour d'un noyau fermé et parcourus par le courant alternatif. La prochaine leçon sera entièrement consacrée à ce type de transformateurs.

NOTIONS A RETENIR

- L'IMPEDANCE ELECTRIQUE (symbole Z) d'une BOBINE, est l'obstacle présenté au COURANT ALTERNATIF par la BOBINE, lorsque la RESISTANCE OHMIQUE des enroulements a une valeur non négligeable.

Cette impédance se calcule en extrayant la racine carrée de la somme des carrés de la REACTANCE et de la RESISTANCE.

Cette définition peut être exprimée plus clairement, à l'aide de la formule :

$Z = \sqrt{R^2 + XL^2}$, avec

Z = IMPEDANCE en ohms

R = RESISTANCE en ohms

XL = REACTANCE en ohms

EXEMPLE : Une bobine présente une REACTANCE INDUCTIVE de 500 Ω à une fréquence déterminée. Sa résistance ohmique est de 100 Ω. Quelle est son IMPEDANCE ?

$$Z = \sqrt{R^2 + XL^2} = \sqrt{100^2 + 500^2} = 510\ \Omega \text{ env.}$$

REMARQUE : Si la valeur de la REACTANCE est beaucoup plus grande que celle de la RESISTANCE, il est évident que la valeur de l'IMPEDANCE, reste sensiblement égale à la valeur de la seule REACTANCE.

C'est en général le cas dans les bobines équipant les circuits électroniques.

Aussi, la formule donnée, s'applique beaucoup plus souvent à un circuit, comportant non seulement une bobine, mais avec en plus une RESISTANCE en série.

EXEMPLE :

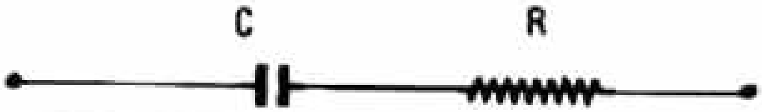
Résistance de la bobine 50 Ω

On applique la formule comme précédemment.

$$R = 250 + 50 = 300\ \Omega$$

$$Z = \sqrt{R^2 + XL^2} = \sqrt{300^2 + 400^2} = 500\ \Omega$$

NOTA : Bien qu'il n'en soit pas question dans cette leçon, il est bon que vous sachiez déjà qu'il existe une formule équivalente à celle ci-dessus, pour le calcul de L'IMPEDANCE d'un CIRCUIT, comportant un CONDENSATEUR et une RESISTANCE en SERIE.



$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{C\,\omega}\right)^2}$$

Là encore, le calcul s'effectue en extrayant la racine carrée de la somme des carrés de la RESISTANCE et de la REACTANCE CAPACITIVE.

- Enfin dans le cas le plus courant d'un circuit, comportant en série une RESISTANCE, une BOBINE et un CONDENSATEUR, on a la formule :

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(XL - \frac{1}{C\,\omega}\right)^2}$$

Cette formule se comprend facilement. Vous savez déjà en effet que le condensateur a l'action inverse de la bobine. En effet, pour une valeur donnée de L et de C, la réactance de la bobine AUGMENTE si la fréquence AUGMENTE alors que la réactance du CONDENSATEUR DIMINUE lorsque la FREQUENCE AUGMENTE.

On comprend donc facilement que la résultante est la différence entre la REACTANCE INDUCTIVE et la REACTANCE CAPACITIVE.

- Pour obtenir un BOBINAGE, dont l'INDUCTANCE est élevée par rapport à sa RESISTANCE, on munit celui-ci d'un NOYAU FERRO-MAGNETIQUE (on parle alors du CIRCUIT MAGNETIQUE du BOBINAGE).

L'augmentation d'INDUCTANCE provient du fait que le NOYAU (en matière ferro-magnétique) est plus PERMEABLE que l'air aux lignes d'induction.

- Le FLUX DE DISPENSION est formé par les lignes d'induction qui ne passent pas dans le NOYAU.

- La RELUCTANCE MAGNETIQUE (symbole $\mathcal{R}$) est la résistance magnétique du noyau.

- La SATURATION MAGNETIQUE est obtenue lorsque le FLUX D'INDUCTION n'augmente plus avec l'augmentation de la f.m.m. (force magnétomotrice).

- L'INDUCTION REMANENTE est L'INDUCTION qui SUBSISTE DANS LE NOYAU, après la disparition du courant.

- Le FLUX D'INDUCTION suit les VARIATIONS DU COURANT alternatif, AVEC UN CERTAIN RETARD. En particulier, le FLUX D'INDUCTION ne devient nul, que lorsque le courant après s'être annulé, recommence à augmenter en sens inverse.

Ce phénomène est appelé HYSTERESIS MAGNETIQUE.

- LE CYCLE D'HYSTERESIS est donc le RETARD DES VARIATIONS DE L'AIMANTATION, par rapport aux variations du courant, produisant cette aimantation.

NOTA : L'étude des circuits électroniques, comportant une résistance et un condensateur, une résistance et un bobinage ainsi qu'une résistance, un bobinage et un condensateur (circuits RLC) sera reprise en détails dans la leçon CIRCUITS ELECTRONIQUES 1.

EXERCICE DE REVISION SUR LA THEORIE 10

1 - Comment s'appelle l'obstacle opposé au courant par une bobine avec résistance ?

2 - Comment calcule-t-on l'obstacle quand on connait la réactance et la résistance d'une bobine ?

3 - Quelle est l'unité de mesure de l'impédance électrique ?

4 - Quels types de noyaux fermés utilise-t-on généralement ?

5 - Pourquoi dit-on qu'un noyau ferro-magnétique est plus perméable que l'air aux lignes d'induction ?

6 - Qu'est-ce que le flux de dispersion ?

7 - Qu'entend-on par circuit magnétique ?

8 - Qu'indique la réluctance magnétique ?

9 - Comment calcule-t-on la réluctance d'un circuit magnétique ?

10 - Quand peut-on dire qu'un noyau est saturé ?

REPONSES A L'EXERCICE DE REVISION SUR LA THEORIE 9

1 - Pour la tension alternative on indique généralement la valeur efficace.

2 - Dans un circuit capacitif le courant continu ne peut pas circuler.

3 - Le courant alternatif qui circule dans un circuit capacitif est dû aux charges et aux décharges successives du condensateur.

4 - Dans un circuit capacitif le courant est déphasé en avance d'un quart de période par rapport à la tension.

5 - Par angle de déphasage on entend l'angle compris entre les deux vecteurs qui représentent la tension et le courant.

6 - La réactance capacitive est l'obstacle opposé au courant par un condensateur ; on la calcule en divisant le nombre 1 par le produit de la valeur de la capacité par 6,28 et par la fréquence.

7 - Dans un circuit inductif c'est la tension qui est déphasée en avance par rapport au courant.

8 - La pulsation d'un courant ou d'une tension alternative est donnée par le produit du nombre 6,28 par la fréquence.

9 - On calcule la réactance inductive en multipliant le nombre 6,28 par la fréquence et par l'inductance.

10 - L'unité de mesure de la réactance capacitive et inductive est l'ohm.