



THEORIE

COURS DE BASE
ELECTRONIQUE

1 - LES TRANSFORMATEURS

Dans les circuits électroniques, on utilise différents types de transformateurs, dont chacun accomplit une fonction particulière. Au cours de cette leçon, nous étudierons le *TRANSFORMATEUR D'ALIMENTATION* ainsi appelé parce qu'il fournit les tensions nécessaires à l'alimentation des appareils.

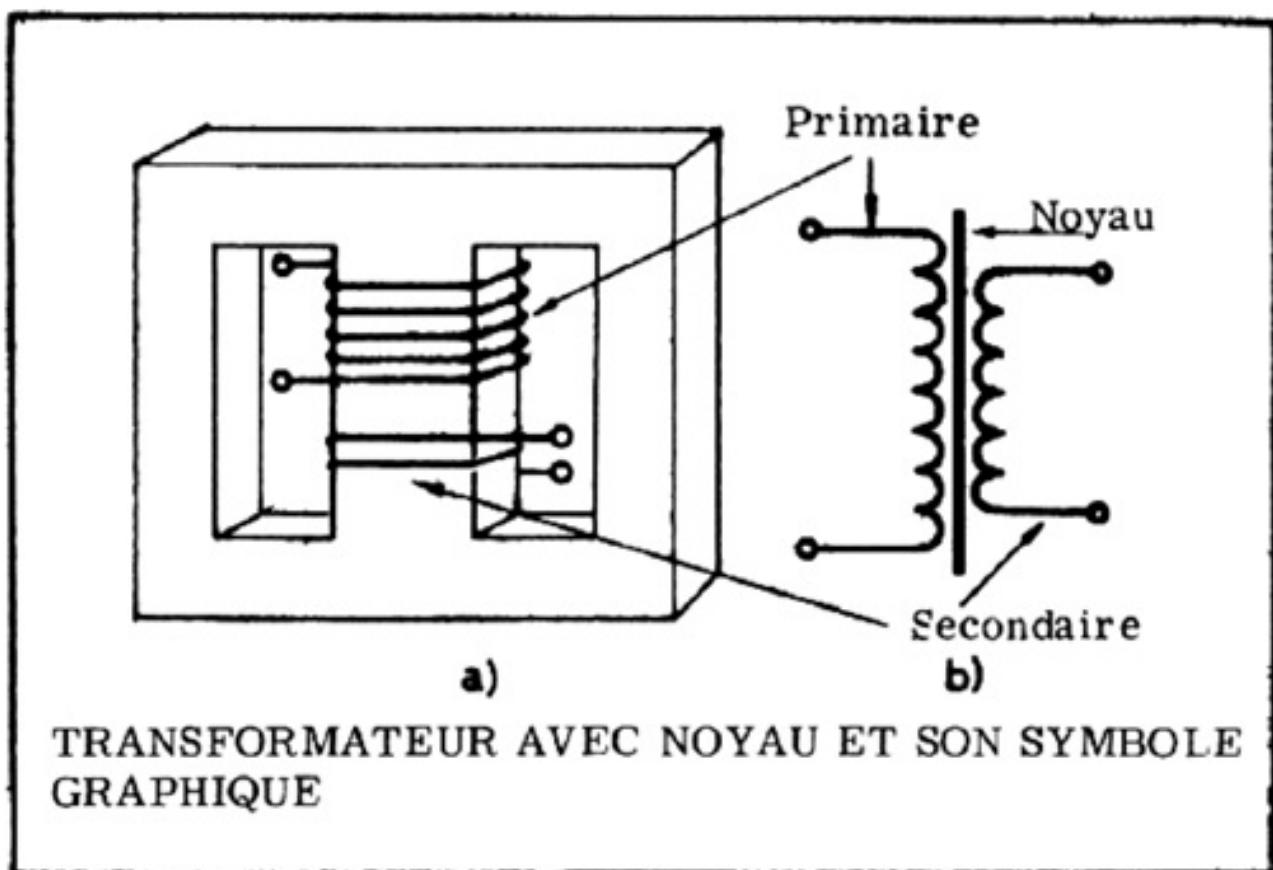
On ne dispose généralement que de la tension du secteur, dont les valeurs les plus courantes sont comprises entre 110 et 240 V, mais pour les appareils électroniques les tensions nécessaires ont une valeur différente de celles-ci. Le transformateur d'alimentation assure précisément la transformation de la tension du secteur, en augmentant ou en diminuant sa valeur de la quantité nécessaire à l'alimentation des différents circuits.

1 - 1 - CONSTITUTION DU TRANSFORMATEUR

Sur la *figure 1 - a* sont représentés les éléments essentiels d'un transformateur, c'est-à-dire le noyau ferromagnétique fermé, et les enroulements disposés autour de la partie centrale du noyau.

Sur cette figure ne sont représentés que deux enroulements ; c'est le nombre minimum qu'un transformateur peut présenter : en effet, l'un des enroulements est relié au secteur, tandis que l'autre, aux extrémités duquel on obtient la tension de valeur différente de celle du secteur, est relié aux circuits à alimenter.

Quand on a besoin de plusieurs tensions de valeurs différentes, on utilise un enroulement supplémentaire pour chaque tension ; les transformateurs peuvent donc comporter trois enroulements ou plus : l'un d'eux est toujours relié au secteur et on l'appelle *ENROULEMENT PRIMAIRE* ou plus simplement *PRIMAIRE*, tandis que les autres enroulements qui sont reliés aux circuits à alimenter sont appelés *ENROULEMENTS SECONDAIRES*, ou plus simplement *SECONDAIRES*.



TRANSFORMATEUR AVEC NOYAU ET SON SYMBOLE GRAPHIQUE

Figure 1

Puisque tous les secondaires se comportent de la même façon, il suffit, pour étudier le fonctionnement d'un transformateur, d'étudier un seul secondaire, comme on l'a fait sur la *figure 1 - a.*

Sur cette figure, le primaire a été dessiné un peu au-dessus du secondaire pour distinguer nettement les deux enroulements qui, en réalité, sont au contraire superposés : le primaire est d'abord enroulé, puis, par-dessus le secondaire.

Sur la *figure 1 - b* on a dessiné le symbole graphique représentant le transformateur sur les schémas électriques : le même symbole graphique que celui déjà utilisé dans les leçons précédentes pour représenter les enroulements des bobinages est utilisé ici pour les enroulements, tandis que le noyau est représenté par un segment de droite tracé entre le primaire et le secondaire. Quand il y a plusieurs secondaires, on les dessine généralement tous du même côté du segment, de façon à ce que de l'autre côté il n'y ait que le primaire.

Nous allons voir maintenant comment fonctionne un transformateur, c'est-à-dire comment son secondaire peut fournir une tension d'une valeur

différente de celle qui est appliquée à son primaire.

1 - 2 - FONCTIONNEMENT A VIDE DU TRANSFORMATEUR

Il nous faut examiner d'abord comment se comporte le transformateur lorsque le primaire est relié au secteur tandis que le secondaire n'est relié à aucun circuit (on dit qu'il est *OUVERT*), comme sur la *figure 2* ; dans ces conditions on dit que le transformateur fonctionne *A VIDE*, parce que son secondaire ne fournit aucun courant.

Le seul courant qui circule dans le transformateur est celui qu'absorbe le primaire relié au secteur ; ce courant, quand il parcourt l'enroulement, aimante le noyau et pour cela on l'appelle *COURANT MAGNETISANT*.

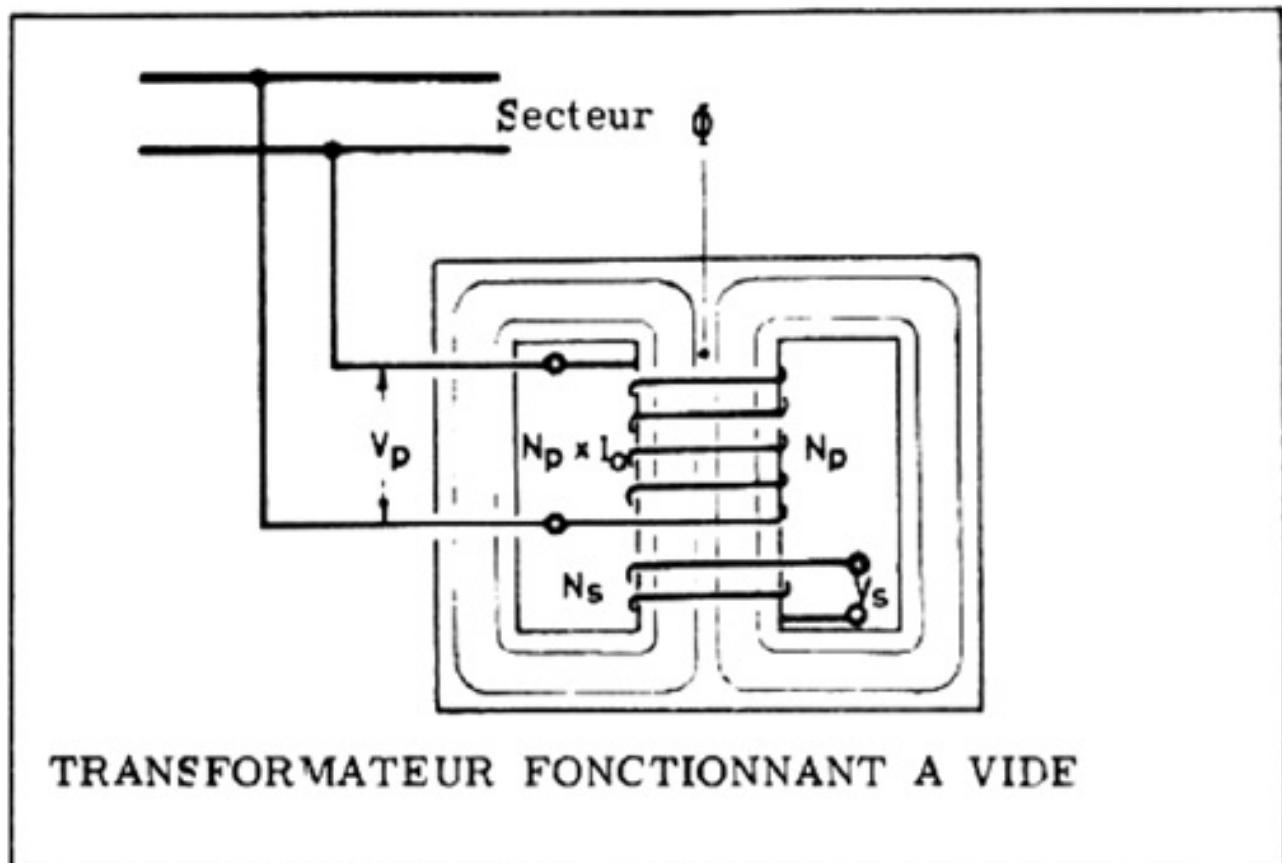


Figure 2

Si l'on indique par N_p le nombre de spires du primaire et par I_o le courant magnétisant, on obtient une f. m. m., donnée par le produit $N_p \times I_o$, qui produit le flux Φ dans le noyau.

Si nous négligeons, pour le moment, la résistance du conducteur qui constitue l'enroulement, nous voyons que le primaire se comporte comme une bobine sans résistance, munie d'un noyau fermé et alimenté par un courant alternatif.

D'après tout ce que nous avons vu dans les leçons précédentes, nous pouvons dire que l'enroulement primaire produit une f. e. m. d'*auto-induction* (que nous indiquons maintenant par E_p) égale à la tension du secteur (que nous indiquons par V_p).

En réalité, la tension V_p appliquée au primaire est légèrement supérieure à la f. e. m. E_p , car elle doit également compenser la chute de tension produite par le courant magnétisant du fait de l'enroulement. Cependant, comme ce courant n'est pas très intense, la chute de tension est assez faible et l'on peut donc la négliger, en retenant par conséquent que, lorsque le transformateur fonctionne à vide, la tension V_p appliquée à son primaire est égale à la f. e. m. E_p produite par celui-ci par auto-induction.

Sur la *figure 2* nous voyons que le flux Φ produit par le primaire est également embrassé par le secondaire : les variations du flux produisent donc dans le secondaire, par induction électromagnétique, une f. e. m. que nous indiquons par E_s .

On peut considérer le secondaire du transformateur comme un générateur qui ne fournit pas de courant, n'étant relié à aucun circuit.

Dans ces conditions, d'une façon analogue à ce qui se produit pour un générateur normal, la tension entre les extrémités du secondaire, tension que nous indiquons par V_s , est donc égale à la f. e. m. E_s induite dans le secondaire même.

Nous voyons ainsi que, lorsque le transformateur fonctionne à vide, la tension V_p appliquée à son primaire et la tension V_s obtenue à son secondaire sont égales aux f. e. m. E_p et E_s induites dans les deux enroulements.

Notons que, si un courant continu et non pas alternatif circulait dans le primaire, le flux ne changerait pas dans le noyau ; par suite aucune f.e.m. ne s'induirait dans le secondaire et l'on n'obtiendrait aucune tension entre les extrémités de cet enroulement : on comprend donc pourquoi un transfor-

mateur ne peut fonctionner qu'avec le courant alternatif et jamais avec le courant continu.

Il faut maintenant rappeler la loi de *Neumann*, (déjà vue dans les leçons précédentes), selon laquelle la f. e. m. induite dans une spire s'obtient en divisant la variation du flux par le temps durant lequel se produit cette variation.

Cette loi est valable pour le primaire comme pour le secondaire du transformateur, et puisque les deux enroulements sont embrassés par le même flux qui varie donc de la même façon pour les deux, nous pouvons dire que dans chaque spire du primaire et dans chaque spire du secondaire s'induisent des f. e. m. égales.

On en déduit que *la valeur des f. e. m. E_p et E_s induites dans le primaire et dans le secondaire est d'autant plus grande que le nombre de spires de ces enroulements est plus grand.*

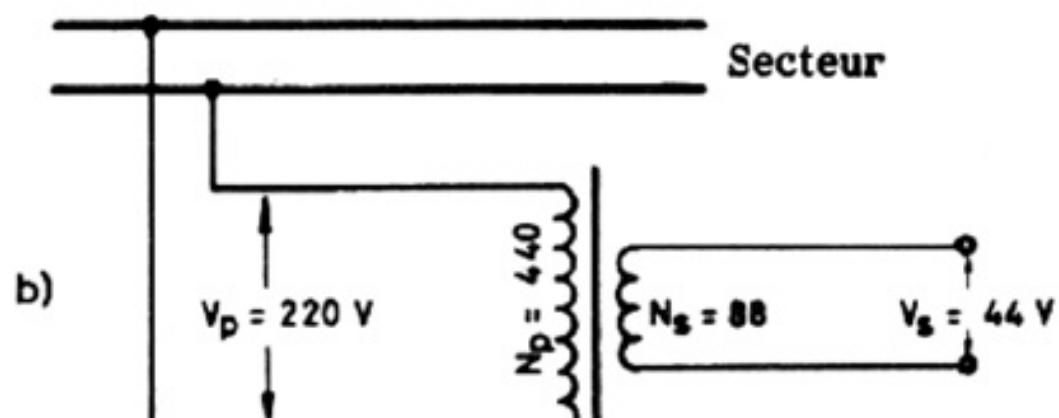
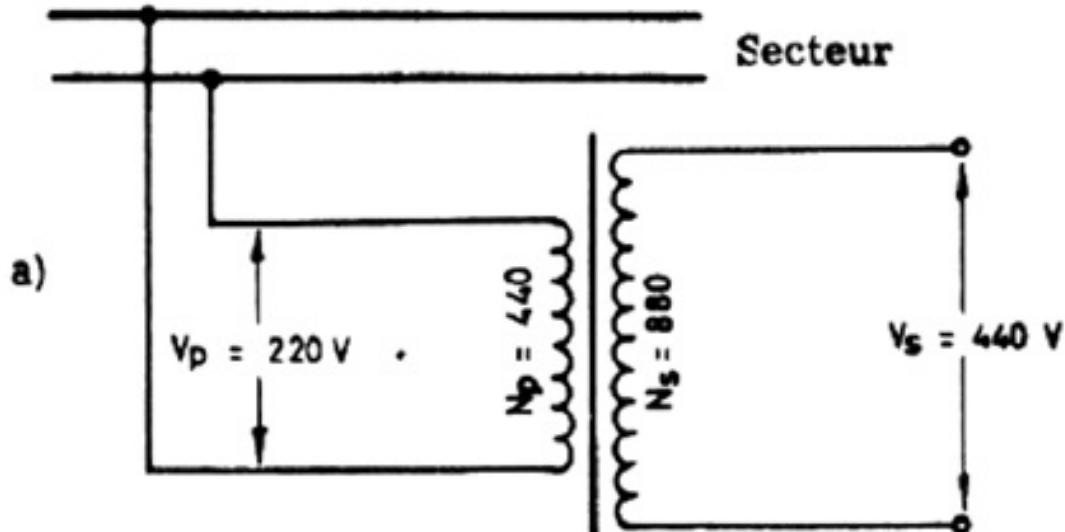
Supposons, par exemple, qu'un transformateur ait un primaire de 440 spires et un secondaire de 880 spires, et que la f. e. m. induite dans chacune de ces spires ait une valeur de 0,5 V : la f. e. m. E_p induite dans le primaire aura la valeur de $440 \times 0,5 = 220$ V, tandis que la f. e. m. E_s induite dans le secondaire aura la valeur de $880 \times 0,5 = 440$ V.

Si nous nous rappelons maintenant que, lorsque le transformateur fonctionne à vide, les f. e. m. E_p et E_s sont égales à la tension primaire V_p et à la tension secondaire V_s , nous pouvons dire que, en appliquant au primaire du transformateur la tension du secteur de 220 V, on obtient au secondaire une tension de 440 V, comme on le voit sur la figure 3 - a, où le nombre des spires primaires et secondaires est indiqué par N_p et N_s .

Dans ce cas, la tension obtenue par le secondaire étant supérieur à celle qui a été appliquée au primaire, le transformateur est appelé un **ELEVATEUR DE TENSION**.

Supposons au contraire qu'un transformateur ait toujours un primaire de 440 spires mais un secondaire de 88 spires seulement; en supposant, là encore, que la f. e. m. induite dans chaque spire ait une valeur de 0,5 V, il s'induit encore dans le primaire une f. e. m. E_p de $440 \times 0,5 = 220$ V, tandis que la f. e. m. E_s induite dans le secondaire est maintenant de $88 \times 0,5 = 44$ V.

Lorsque le transformateur fonctionne à vide, en appliquant à son primaire la même tension du réseau V_p de 220 V, on obtient donc à son se-



TRANSFORMATEUR ELVATEUR ET TRANSFORMATEUR ABAISSEUR DE TENSION

Figure 3

condeire la tension V_s de 44 V, comme indiqué sur la figure 3 - b.

Puisqu'on obtient au secondaire une tension inférieure à celle qui a été appliquée au primaire, le transformateur est appelé **ABAISSEUR DE TENSION**.

En divisant la tension secondaire d'un transformateur par sa tension primaire, on obtient le **RAPPORT DE TRANSFORMATION** du transformateur, que l'on indique par la lettre n .

Le transformateur de la figure 3-a a donc un rapport de transformation donné par $440 : 220 = 2$, c'est-à-dire supérieur à 1, parce qu'il s'agit d'un transformateur élévateur de tension, la tension primaire étant égale à la moitié de la tension secondaire. Le rapport de transformation du deuxième transformateur est donc $n = 0,2$, c'est-à-dire inférieur à 1, car il s'agit d'un transformateur réducteur de tension, la tension primaire étant cinq fois plus grande que la tension secondaire.

Notons maintenant que, si nous divisons le nombre de spires du secondaire N_s par le nombre de spires du primaire N_p , nous obtenons le nombre qui indique le rapport de transformation.

En effet, en faisant cette division pour le transformateur de la figure 3-a, qui a 440 spires primaires et 880 spires secondaires, on obtient $880 : 440 = 2$, nombre égal au rapport de transformation du transformateur ; d'une façon analogue, pour le transformateur de la figure 3-b, on obtient $88 : 440 = 0,2$.

Nous pouvons donc dire que, *le rapport de transformation d'un transformateur est égal au nombre obtenu en divisant les spires du secondaire par les spires du primaire.*

Ceci signifie que si un transformateur doit fournir, par exemple, une tension secondaire deux fois plus grande que la tension primaire, les spires du secondaire doivent être deux fois plus nombreuses que celles du primaire ; si, au contraire, il doit fournir une tension secondaire cinq fois plus petite que celle du primaire, les spires du secondaire doivent être cinq fois moins nombreuses que celles du primaire.

Pour réaliser un transformateur, il suffit donc de savoir combien de spires il faut enrouler à son primaire car, d'après le rapport de transformation que l'on veut obtenir, on peut déterminer le nombre de spires du secondaire.

Pour trouver le nombre de spires du primaire, il faut d'abord calculer

la f. e. m. produite par auto-induction dans chaque spire de l'enroulement ; pour cela, on se reporte à la loi de *Neumann*, d'après laquelle on doit tenir compte de la variation du flux et du temps pendant lequel se produit cette variation, c'est-à-dire de sa rapidité.

Nous observons que le flux produit par un courant alternatif varie comme ce courant entre une valeur nulle et une valeur maximum ; sa variation sera donc d'autant plus grande que cette valeur maximum est grande. Pour la même raison, la rapidité de variation du flux est égale à celle du courant qui le produit.

Nous avons vu dans les leçons précédentes que la rapidité avec laquelle varie une grandeur alternative sinusoïdale est appelée la *pulsation*, et qu'elle est donnée par le produit du nombre 6,28 par la fréquence.

En multipliant donc le nombre 6,28 par la fréquence et par la valeur maximum du flux d'induction, on obtient la valeur maximum de la f. e. m. induite dans chaque spire du primaire.

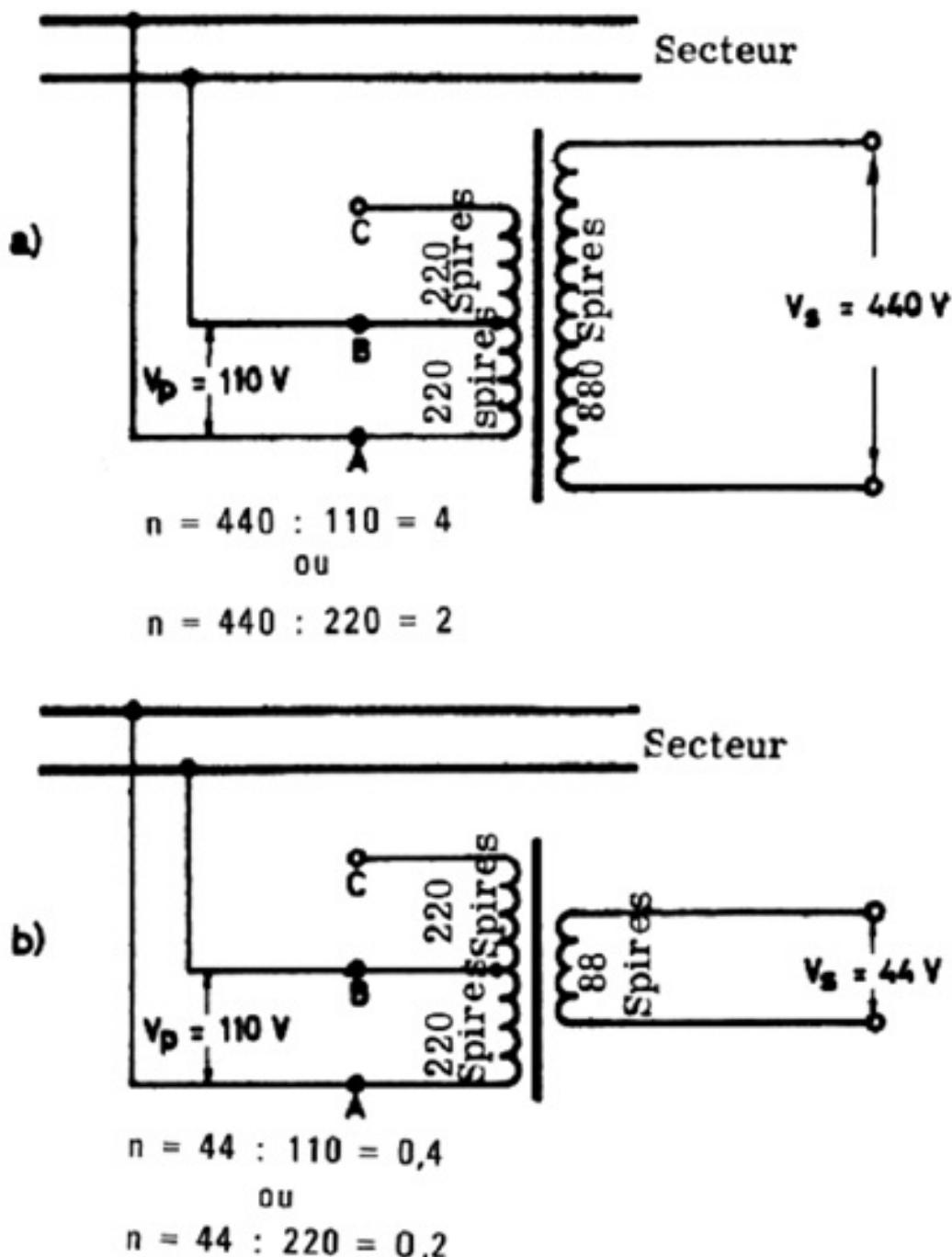
En divisant la valeur maximum de la f. e. m. par 1,41 on trouve la valeur efficace, mais comme le nombre 6,28 divisé par 1,41 donne environ 4,44 nous pouvons également dire que la valeur efficace de la f. e. m. induite dans chaque spire du primaire d'un transformateur s'obtient en multipliant le nombre 4,44 par la fréquence du courant et par la valeur maximum du flux d'induction.

Comme nous l'avons déjà vu, en multipliant cette f. e. m. par le nombre de spires du primaire, on obtient la valeur efficace de la f. e. m. E_p induite dans le primaire, égale à la tension de réseau V_p appliquée à ce primaire.

Nous trouvons donc que *la tension du secteur doit être égale au produit du nombre 4,44 par la fréquence, par la valeur maximum du flux et par le nombre de spires du primaire*.

Pour déterminer ce nombre de spires, il suffit de diviser la tension du secteur par le produit de 4,44 par la fréquence et par la valeur maximum du flux ; la tension du secteur et la fréquence sont toujours connues, tandis qu'il faut chercher la valeur maximum du flux, ce que nous verrons plus tard.

Tout ceci nous montre que le nombre de spires du primaire est d'autant plus grand que la valeur efficace de la tension que l'on veut appliquer au transformateur est plus grande. Pour utiliser un transformateur avec des tensions de réseau différentes, il suffit donc de faire varier correctement le nombre de spires du primaire auxquelles on applique chacune de ces tensions.



TRANSFORMATEUR FONCTIONNANT AVEC DEUX RAPPORTS DIFFERENTS DE TENSIONS

Figure 4

La *figure 4* montre, par exemple, comment on peut utiliser les transformateurs de la *figure 3* avec une tension de secteur de 110 V.

Puisque la tension de 220 V s'applique à chacune des 440 spires du primaire, la tension de 110 V, d'une valeur égale à la moitié de la précédente, doit s'appliquer à un nombre de spires égal aussi à la moitié du précédent, c'est-à-dire à seulement 220 spires. Pour cela on utilise une *PRISE INTERMEDIAIRE* (indiquée par B sur la *figure 4*) disposée de façon à ce que, entre l'extrémité A de l'enroulement et cette prise soient comprises les 220 spires nécessaires, tandis que les 220 spires de l'enroulement qui restent comprises entre l'extrémité C et la prise B, ne sont pas utilisées.

De cette façon le rapport de transformation de ces transformateurs est également réduit de moitié : en effet, si l'on compare la *figure 3* et la *figure 4*, on voit que, pour le transformateur élévateur de tension, le rapport de transformation passe de 0,5 à 0,25, tandis que, pour le transformateur abaisseur de tension, le même rapport passe de 5 à 2,5.

De nombreux transformateurs ont un primaire comportant plusieurs prises intermédiaires, chacun étant adaptée à une valeur de tension particulière ; ces primaires sont appelés *UNIVERSELLES* parce qu'ils permettent d'utiliser le transformateur avec toutes les valeurs possibles que peut prendre la tension du secteur.

On peut également utiliser les prises intermédiaires pour le secondaire, quand on a besoin de tensions inférieures à celle que l'on a obtenue aux extrémités de l'enroulement : par exemple, avec une prise posée à la moitié du secondaire du transformateur de la *figure 4 - a*, on pourrait obtenir deux tensions de 220 V, entre cette prise et chaque extrémité de l'enroulement.

1 - 3 - FONCTIONNEMENT EN CHARGE DU TRANSFORMATEUR

Nous allons voir maintenant comment se modifie le fonctionnement du transformateur lorsque son secondaire est relié au circuit qui doit être alimenté grâce à la tension V_s fournie par l'enroulement.

Dans ces conditions, on dit que le transformateur fonctionne *en charge*, car le circuit relié à son secondaire est aussi appelé la *CHARGE* du transformateur.

En supposant que ce circuit ne comprenne qu'une "résistance", comme sur la *figure 5*, la tension secondaire V_s y fera circuler un courant secondaire (indiqué par I_s) dont l'intensité est égale à la tension secondaire divisée

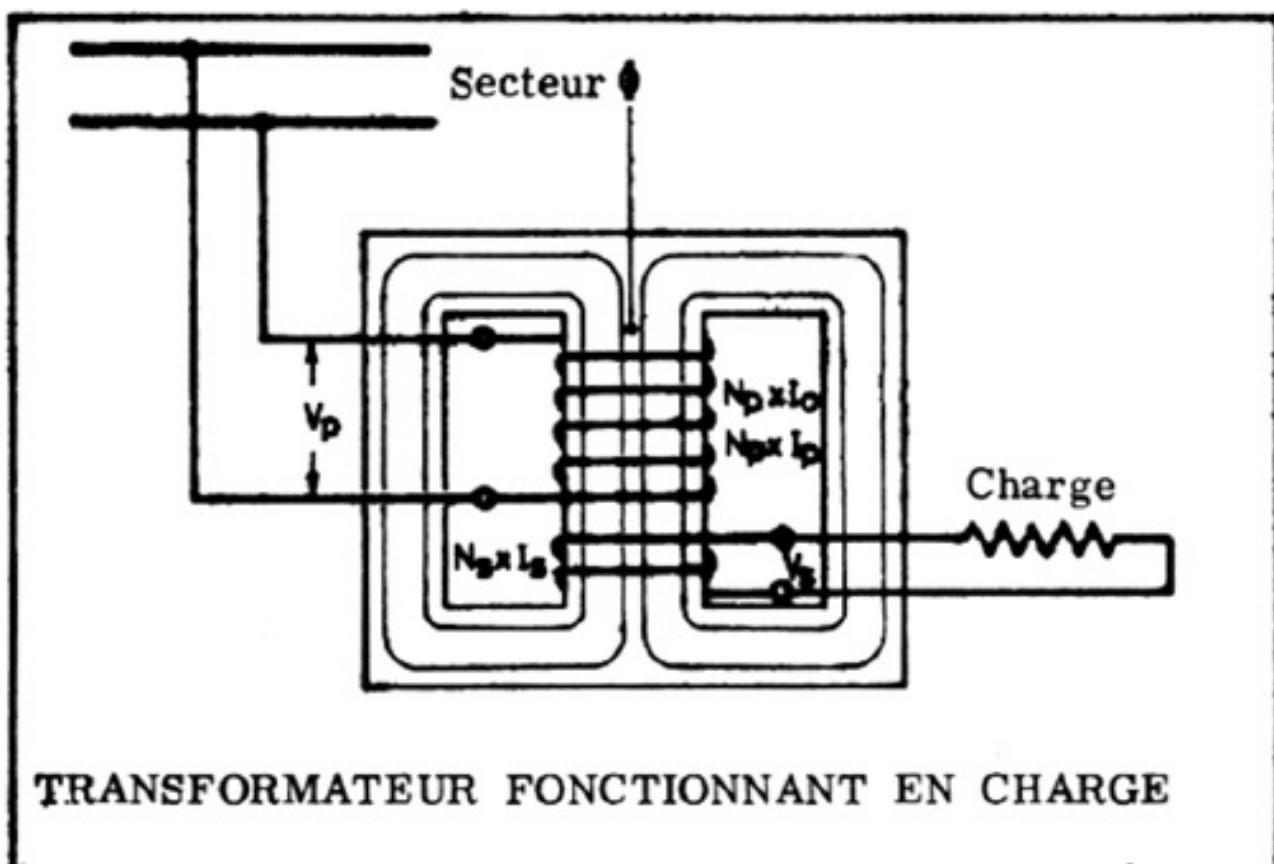


Figure 5

par la valeur de la résistance, conformément à la loi d'Ohm. Comme ce courant traverse la charge constituée par la résistance, on l'appelle aussi *COURANT DE CHARGE*.

En circulant dans les spires du secondaire, le courant de charge produit à son tour un flux d'induction apte à s'opposer, selon la loi de Lenz, à la cause qui l'a engendré, c'est-à-dire à la variation du flux Φ produit par le courant d'aimantation I_o .

On pourrait donc penser que le flux produit par le courant secondaire en s'opposant à la variation du flux Φ produit par le courant d'aimantation, rend impossible le fonctionnement du transformateur ; mais au contraire, dès que commence la circulation du courant secondaire I_s et donc que le flux se produit, le primaire prend au réseau un nouveau courant, que nous indiquons par I_p , et produit ainsi à son tour un troisième flux qui, à chaque instant, est égal et opposé à celui que produit le courant secondaire et en neutralise ainsi l'effet.

C'est en cela que consiste le phénomène d'induction mutuelle selon

lequel, comme nous l'avons déjà vu dans les leçons précédentes, les enroulements agissent l'un sur l'autre : en effet, de même que le primaire détermine la circulation du courant I_s dans le secondaire, de même le secondaire, à son tour, détermine la circulation du courant I_p dans le primaire.

Du moment que les deux flux produits par ces courants sont égaux et opposés et donc qu'ils s'annulent réciproquement, quand le transformateur fonctionne en charge, on n'a pratiquement dans son noyau que le seul flux Φ produit par le courant d'aimantation I_o , comme dans le fonctionnement à vide.

Notons que, lorsque le transformateur fonctionne en pleine charge, le courant I_o est très inférieur au courant I_p ; c'est pourquoi nous nous limiterons dorénavant à l'étude de ce courant.

Puisque ces deux flux sont égaux, les f. m. m. qui les produisent doivent aussi être égales : la f. m. m. primaire, indiquée par le produit $N_p \times I_p$ sur la *figure 5*, doit donc être égale à la f. m. m. secondaire, indiquée par le produit $N_s \times I_s$ sur la même *figure 5*.

Cette égalité entre les f. m. m. permet de voir quelle relation existe entre le nombre de spires du primaire et du secondaire et entre les courants correspondants I_p et I_s .

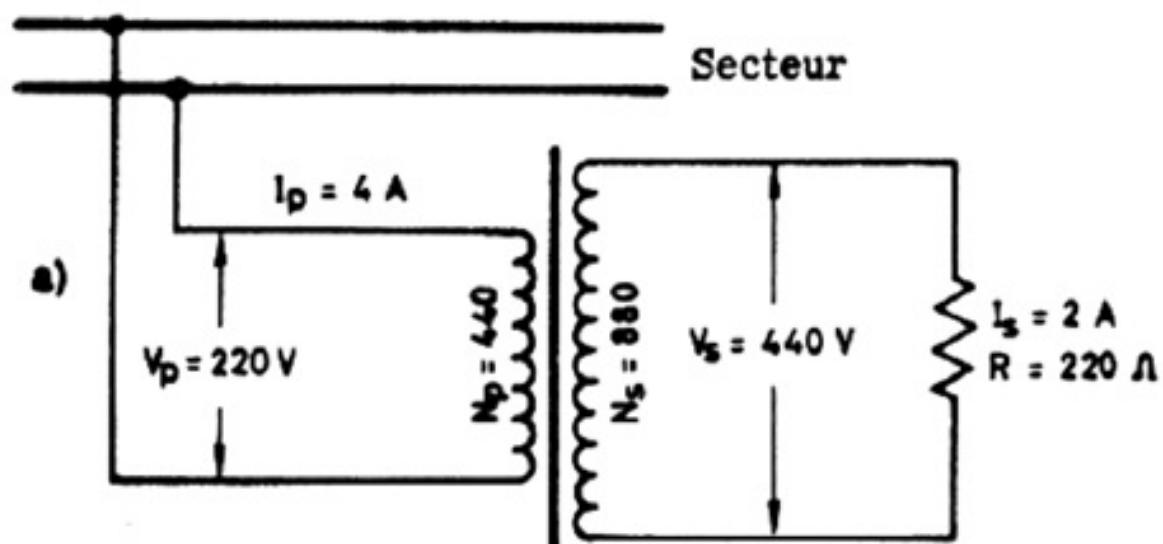
Etudions pour cela la *figure 6*, où sont reportés les transformateurs de la *figure 3*; les secondaires sont maintenant reliés à des "résistances" d'une valeur permettant de faire circuler le même courant de charge de 2 A.

Comme le secondaire du transformateur de la *figure 6 - a* comprend 880 spires, la f. m. m. due au courant de 2 A qui circule dans cet enroulement est de $880 \times 2 = 1.760$ A-t.

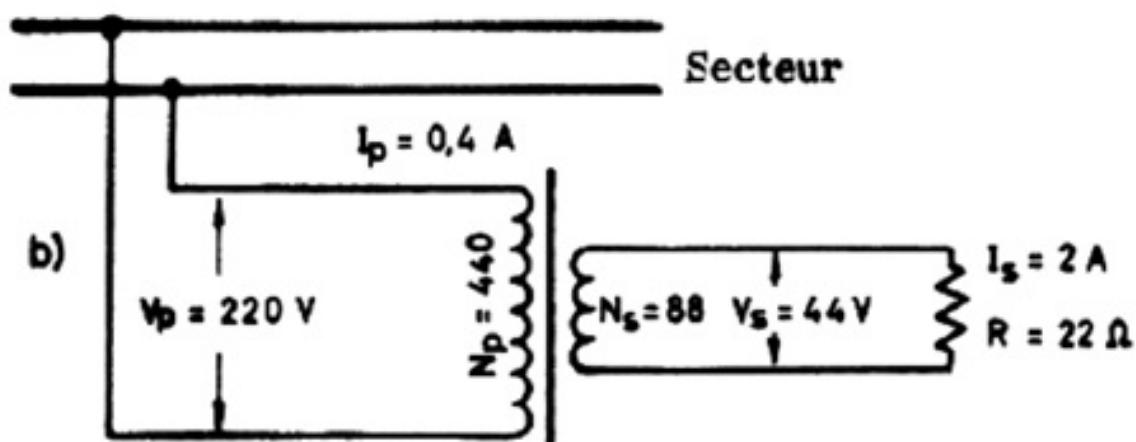
D'autre part, puisque le primaire de ce transformateur a un nombre de spires égal à la moitié de celui du secondaire (440 au lieu de 880), pour produire la même f. m. m. cet enroulement doit être parcouru par un courant deux fois plus grand que celui du secondaire, c'est-à-dire par un courant de 4 A : en effet, dans ce cas, on obtient encore $440 \times 4 = 1.760$ A-t.

Nous voyons ainsi que le transformateur élève la valeur de la tension, en la doublant de 220 V à 440 V, mais qu'il réduit dans le même rapport l'intensité du courant, en la rabaissant en effet de 4A à 2A.

Pour le transformateur de la *figure 6 - b*, la f. m. m. du secondaire n'est égale qu'à $88 \times 2 = 176$ A-t, car son enroulement n'a que 88 spires parcourues par le courant de 2 A.



$$n = 440 : 220 = 2$$



$$n = 44 : 220 = 0,2$$

COURANTS CIRCULANT DANS LES TRANSFORMATEURS EN CHARGE

Figure 6

Pour produire la même f. m. m., le primaire, qui a un nombre de spires cinq fois plus grand que le secondaire (440 au lieu de 88), doit être parcouru par un courant cinq fois plus petit que celui du secondaire, donc égal à $0,4A$: on obtient encore $440 \times 0,4$ A-t.

Nous voyons ainsi que, dans ce cas, le transformateur réduit la valeur de la tension de cinq fois, de 220 V à 44 V, mais qu'il élève dans le même rapport l'intensité du courant, en la multipliant par cinq et en la portant ainsi de $0,4A$ à $2A$.

Nous trouvons ainsi que, *tandis que les tensions du primaire et du secondaire sont d'autant plus grandes que le nombre de spires des enroulements correspondants est plus élevé, au contraire les courants sont d'autant plus faibles que le nombre de spires des mêmes enroulements est plus grand.*

Pour comprendre ceci, il faut étudier la puissance électrique en jeu dans le transformateur.

La puissance secondaire s'obtient en multipliant la tension fournie au secondaire par le courant qui circule dans cet enroulement ; par exemple, pour le transformateur de la *figure 6 - a* cette puissance est de $440 \times 2 = 880W$.

En multipliant la tension appliquée au primaire par le courant qui circule dans cet enroulement on obtient, au contraire, la puissance primaire, qui est donc de $220 \times 4 = 880 W$ pour le même transformateur de la *figure 6-a*.

De la même façon, pour le transformateur de la *figure 6 - b* la puissance secondaire est de $44 \times 2 = 88 W$, et la puissance primaire est de $220 \times 0,4 = 88 W$.

Nous voyons ainsi que, dans le cas d'un transformateur élévateur de tension, comme dans celui d'un transformateur abaisseur de tension, la puissance fournie par le secondaire à la charge est égale à celle fournie par le réseau au primaire : *ceci signifie que le transformateur se contente de transporter du primaire au secondaire la puissance nécessaire à la charge qu'on y relie, en faisant toutefois varier les valeurs de la tension et du courant dont dépend cette puissance.*

En réalité, la puissance fournie par le réseau au transformateur est toujours un peu supérieure à celle qui est nécessaire pour la charge, car une partie de cette puissance est perdue dans le transformateur ; nous allons donc voir comment il peut se produire des *PERTES DE PUISSANCE* dans le transformateur.

1 - 4 - PERTES DE PUISSANCE DANS LE TRANSFORMATEUR

Les pertes de puissance se produisent dans les enroulements et dans le noyau du transformateur.

La puissance perdue dans les enroulements est due à la résistance du conducteur qui les constitue, résistance donnant lieu à des chutes de tension qui ne sont plus négligeables lorsque le transformateur, fonctionnant en charge, est parcouru par des courants plus intenses que lorsqu'il fonctionne à vide.

L'effet de ces chutes de tension produites dans les enroulements consiste en une réduction de la tension secondaire, réduction que l'on peut empêcher en bobinant au secondaire un nombre de spires légèrement supérieur à celui qui est nécessaire pour obtenir le rapport de transformation voulu.

De cette façon, lorsque le transformateur fonctionne à vide, on obtient une tension secondaire un peu supérieure à la valeur que l'on devrait avoir, mais qui descend à cette valeur exacte quand le transformateur fonctionne en charge, précisément à cause des chutes de tension.

La puissance perdue dans les enroulements se dissipe sous forme de chaleur, déterminant une augmentation de la température des enroulements, avec le risque de détériorer leur isolement.

Il faut se rappeler en effet que les spires, enroulées sur plusieurs couches superposées, sont isolées l'une de l'autre par l'émail qui recouvre les fils, et que les couches sont isolées entre elles par des bandes de papier paraffiné.

On comprend tout de suite que l'émail et le papier paraffiné peuvent s'abîmer si le conducteur atteint une température excessive, causant ainsi des court-circuits entre les spires et rendant inutilisables les enroulements. Pour éviter ceci, il faut utiliser des conducteurs d'une section appropriée au courant qui doit les parcourir, de façon à ne pas avoir des dissipations de puissance excessives et des augmentations de température dangereuses.

On détermine la section des conducteurs d'après la DENSITE DE COURANT maximum admissible, c'est-à-dire d'après le courant maximum qui peut traverser chaque millimètre carré de leur section sans porter la température à des valeurs dangereuses.

La densité de courant la mieux adaptée est souvent donnée par les résultats obtenus dans la pratique. Pour les transformateurs que nous sommes en train d'étudier, on a constaté que la densité du courant ne devait pas dépasser 3A pour chaque millimètre carré de la section. Ceci signifie que, si un enroulement doit être parcouru par un courant de 3A, le conducteur qui le constitue doit avoir une section de 1mm^2 ; si, au contraire l'enroulement doit être parcouru par un courant de 6A, le conducteur devra avoir une section de 2 mm, de façon à ce que sur chaque millimètre carré il n'y ait toujours que 3A ; si le courant n'est que de 1,5A, il suffit que le conducteur ait une section de $0,5\text{ mm}^2$.

On indique la densité du courant par la lettre grecque ι (iota) et on la mesure en *AMPERE PAR METRE CARRE* (symbole A/m^2). Dans la pratique, il est incommod de mesurer les petites sections des conducteurs en mètres carrés et l'on utilise donc le millimètre carré, comme on l'a vu plus haut ; la densité du courant est donc généralement exprimée en *AMPERE PAR MILLIMETRE CARRE* (symbole A/mm^2).

Tout ceci nous permet de comprendre pourquoi, quand on utilise un transformateur, il faut veiller à ne pas relier à son secondaire une charge exigeant un courant supérieur au courant maximum que peut fournir l'enroulement, ceci afin de ne pas dépasser dans les conducteurs la densité maximum de courant admissible et de ne pas risquer d'endommager le transformateur.

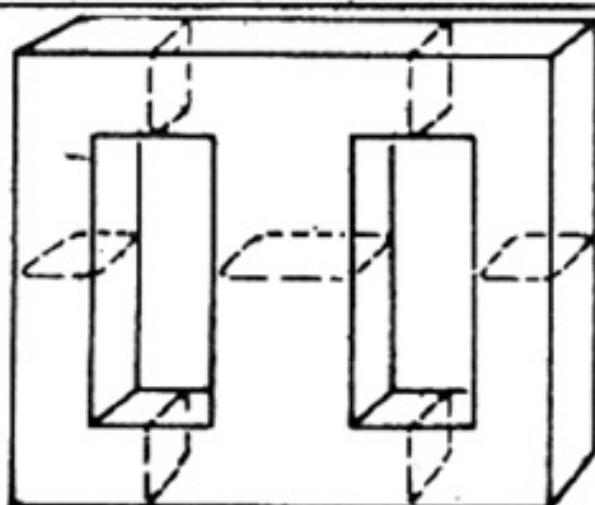
Normalement le constructeur du transformateur indique le courant de charge, et la puissance secondaire exprimée en général en *VOLTAMPERE* (symbole VA), c'est-à-dire par le produit des volts par les ampères du secondaire.

Examinons maintenant les pertes de puissance qui se produisent dans le noyau du transformateur.

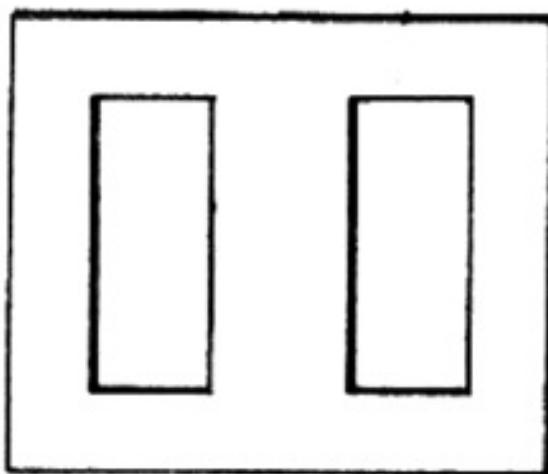
Nous devons d'abord observer que, de même que le primaire induit un courant dans le secondaire, de même il induit un courant dans le noyau (celui-ci étant d'une matière ferromagnétique, est également un conducteur). Ces courants sont appelés *PARASITES* ou *DE FOUCAULT*, du nom du Français Léon Foucault (1819-1868) qui, le premier, en démontra expérimentalement l'existence.

Quand ils circulent dans le noyau, les courants parasites dissipent une puissance électrique qui doit être considérée comme perdue car elle ne peut pas être transportée du primaire au secondaire.

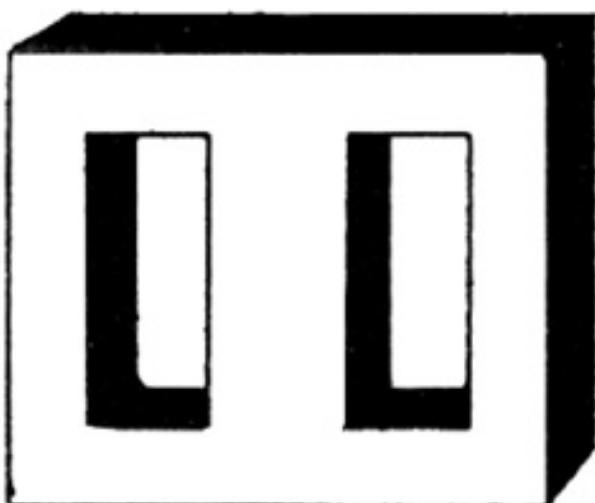
a)



b)



c)



COURANTS PARASITES DANS LE NOYAU ET MANIERE
DE LES REDUIRE

Figure 7

Il faut réduire autant que possible les courants parasites et pour cela il faut savoir qu'ils circulent dans les différents espaces du noyau selon les parcours indiqués par les pointillés de la *figure 7 - a*.

Pour que les courants ne suivent pas ces parcours, le noyau n'est pas fabriqué d'un bloc massif unique, mais de nombreuses feuilles de tôle très fine, qui ont toutes la forme indiquée par la *figure 7 - b*; une face des tôles est isolée par une feuille de papier ou, plus souvent, par une couche de vernis. Les tôles sont jointes entre elles, comme sur la *figure 7 - c*, en nombre suffisant pour former le noyau de l'épaisseur voulue.

De cette façon, les courants parasites ne peuvent plus suivre les parcours indiqués par la *figure 7 - a*, car entre deux tôles, ils rencontrent la couche isolante; ils circulent donc dans chaque tôle, mais, étant donné l'épaisseur très petite de celles-ci, ils rencontrent une résistance très importante qui réduit sensiblement leur intensité.

De plus on ne construit pas les tôles avec du fer pur, mais avec du fer mélangé à un peu de silicium, ce qui augmente encore leur résistance, en réduisant ainsi à des valeurs assez basses les courants parasites et les pertes qu'ils produisent.

En plus de ces pertes, il y a également dans le noyau des pertes par hystérésis. Comme nous l'avons vu dans la leçon précédente, le phénomène d'*hystérésis magnétique* consiste en un certain retard des petits aimants élémentaires à suivre, par leur orientation, les variations du courant alternatif; ce retard est l'indice d'une certaine "paresse" des petits aimants à s'orienter, "paresse" qui doit être vaincue aux dépens d'une puissance électrique que l'on doit donc considérer comme perdue, car elle ne peut pas être transportée jusqu'au secondaire et utilisée par la charge.

1 - 5 - SECTION DU NOYAU

En ce qui concerne le noyau, nous devons encore voir comment l'on peut déterminer le flux d'induction qui le traverse.

D'après ce qui a déjà été dit dans la leçon précédente à propos des circuits magnétiques, nous savons pourquoi le flux traversant le noyau peut être comparé au courant circulant dans un circuit électrique.

Nous avons étudié précédemment la densité du courant; pour le noyau, nous devons étudier maintenant la *DENSITE DU FLUX*, appelée plus

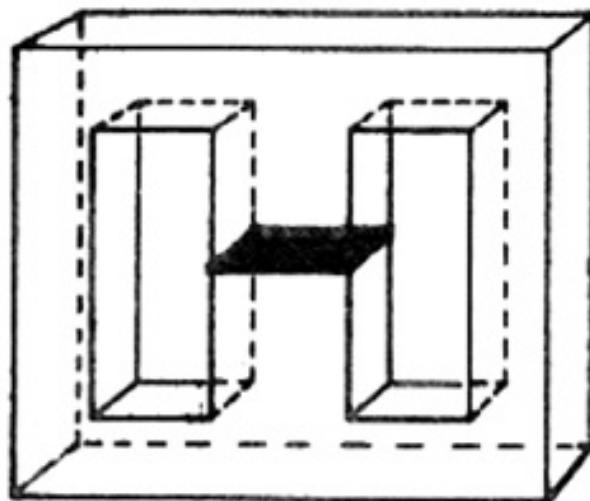
souvent *INDUCTION*, c'est-à-dire le flux qui traverse chaque centimètre carré de la section du noyau.

On étudie cette section du noyau d'après celle, tracée en noir sur la figure 8, qui est traversée perpendiculairement par les lignes d'induction du flux entier.

On indique l'induction par la lettre *B* et on la mesure en *WEBER PAR METRE CARRE* (symbole Wb/m^2) ; parfois l'induction peut être exprimée en *WEBER PAR CENTIMETRE CARRE* (symbole wb/cm^2) car le centimètre carré est une unité plus commode que le mètre carré pour indiquer la section du noyau.

Nous avons étudié la densité du courant pour limiter à des valeurs non dangereuses la température des condensateurs ; nous devons étudier la densité du flux pour éviter que la saturation du noyau ne se produise (on a déjà parlé de cette saturation dans les leçons précédentes).

En effet, si l'induction atteint des valeurs trop élevées, c'est-à-dire si chaque centimètre carré de la section du noyau est traversé par un flux excessif, le noyau se sature car tous ses petits aimants sont alors orientés ; le flux



SECTION DU NOYAU TRAVERSEE PAR LA TOTALITE DU FLUX D'INDUCTION

Figure 8

ne peut plus augmenter sensiblement, même si le courant qui le produit augmente toujours. Ceci doit être évité car, pour que le fonctionnement du transformateur soit correct, le flux doit toujours varier en même temps que le courant.

Les valeurs de l'induction sont également trouvées par la pratique : d'après celle-ci on assigne généralement à l'induction une valeur maximum comprise entre 1 Wb/m^2 et $1,3 \text{ Wb/m}^2$.

Si l'on connaît l'induction, c'est-à-dire le flux qui traverse chaque mètre carré, ou, mieux, chaque centimètre carré de la section du noyau, et si l'on connaît aussi la surface de cette section, on peut déterminer le flux maximum, en multipliant l'induction par la section.

Pour trouver la section du noyau on peut également avoir recours à la pratique, qui a permis de constater que *l'on pouvait calculer cette section en extrayant la racine carrée de la puissance du transformateur et en multipliant le nombre obtenu par 1,1*.

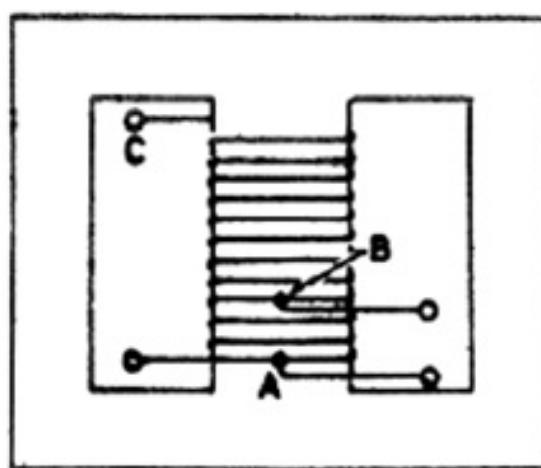
Ainsi le flux d'induction dépend de la puissance du transformateur et ceci justifie le procédé dont nous avons parlé, car le transport de puissance du primaire au secondaire se produit précisément par l'intermédiaire du flux d'induction embrassé par les deux enroulements, et l'on comprend que ce flux doit être d'autant plus grand que cette puissance est plus grande.

2 - AUTOTRANSFORMATEURS

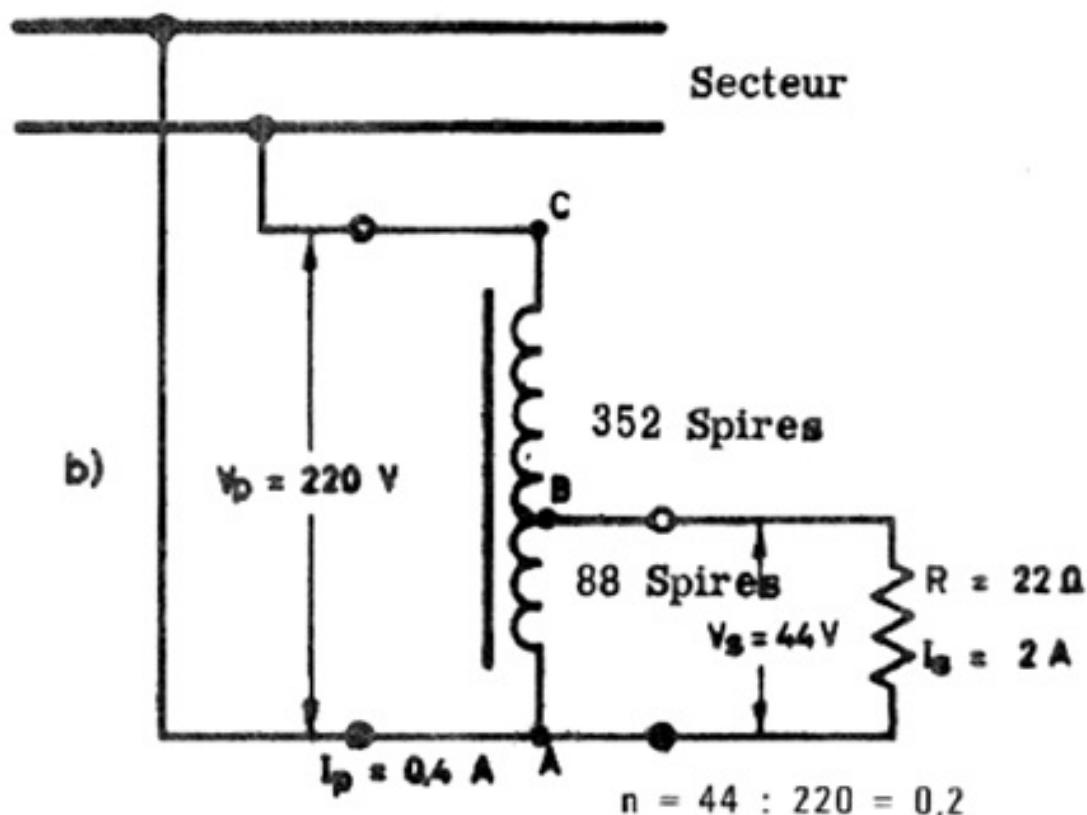
Comme nous l'avons vu, le transformateur fonctionne d'après le phénomène de l'induction réciproque qui se produit entre les deux enroulements ; mais, dans les leçons précédentes, nous avons étudié également le phénomène analogue de l'auto-induction qui se produit dans un enroulement unique. En exploitant ce dernier phénomène, on a réalisé un dispositif analogue au transformateur et qui ne comprend pourtant qu'un seul enroulement à la place du primaire et du secondaire. Ce dispositif est appelé *AUTOTRANSFORMATEUR* et, comme le transformateur il peut être soit un élévateur soit un abaisseur de tension.

Pour mieux comprendre le fonctionnement de l'autotransformateur, il faut étudier d'abord l'autotransformateur réducteur de tension qui, comme on le voit sur la figure 9 - a, est constitué par un noyau (du même type que celui qui est utilisé pour les transformateurs) autour duquel est disposé l'en-

a)



b)



AUTOTRANSFORMATEUR ABAISSEUR DE TENSION

Figure 9

roulement, muni d'une prise intermédiaire indiquée par B et d'une seconde prise reliée à l'extrémité A.

Sur la *figure 9 - b* est dessiné le symbole graphique qui sert à représenter l'autotransformateur dans les schémas électriques et l'on voit comment cet élément est relié au secteur et à la charge.

Puisque l'enroulement comprend $352 + 88 = 440$ spires, si nous supposons que le flux embrassé par ces spires induit dans chacune d'elles une f. e. m. de 0,5 V, on obtient entre les extrémités A et C une f. e. m. de $440 \times 0,5 = 220$ V, égale à la tension du secteur appliquée entre ces extrémités.

Si dans chaque spire, on induit 0,5 V, aux extrémités des 88 spires comprises entre l'extrémité A et la prise intermédiaire B s'induit une f. e. m. de $88 \times 0,5 = 44$ V, grâce à laquelle on peut faire circuler un courant de 2A dans la résistance de 22Ω .

Nous voyons donc qu'avec l'autotransformateur on peut réduire la tension du secteur de cinq fois, de 220 V à 44 V, comme on l'a fait avec le transformateur de la *figure 6 - b*.

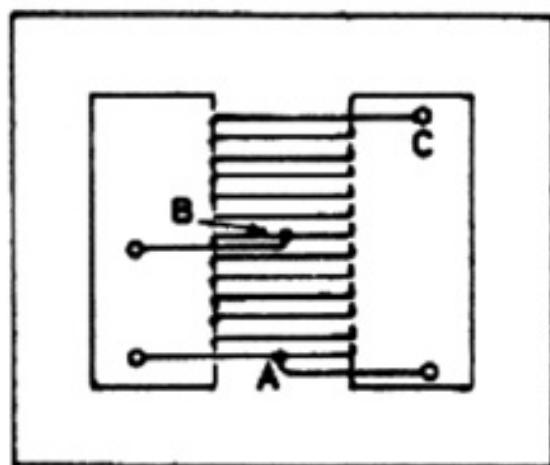
On obtient donc la tension de la charge sur une partie du même enroulement auquel est appliquée la tension du secteur : les 440 spires comprises entre A et C, entre lesquelles on applique la tension du secteur, peuvent donc être considérées comme des spires primaires, tandis que les 88 spires comprises entre l'extrémité A et la prise B, où l'on obtient la tension de la charge peuvent être considérées comme des spires secondaires.

Ainsi, entre le nombre de ces spires primaires et secondaires et entre les courants et les tensions correspondants, les relations que nous avons trouvées pour les transformateurs sont valables. En particulier, nous appellerons *RAPPORT DE TRANSFORMATION DE L'AUTOTRANSFORMATEUR*, le nombre obtenu en divisant la tension délivrée par le secondaire par la tension appliquée au primaire.

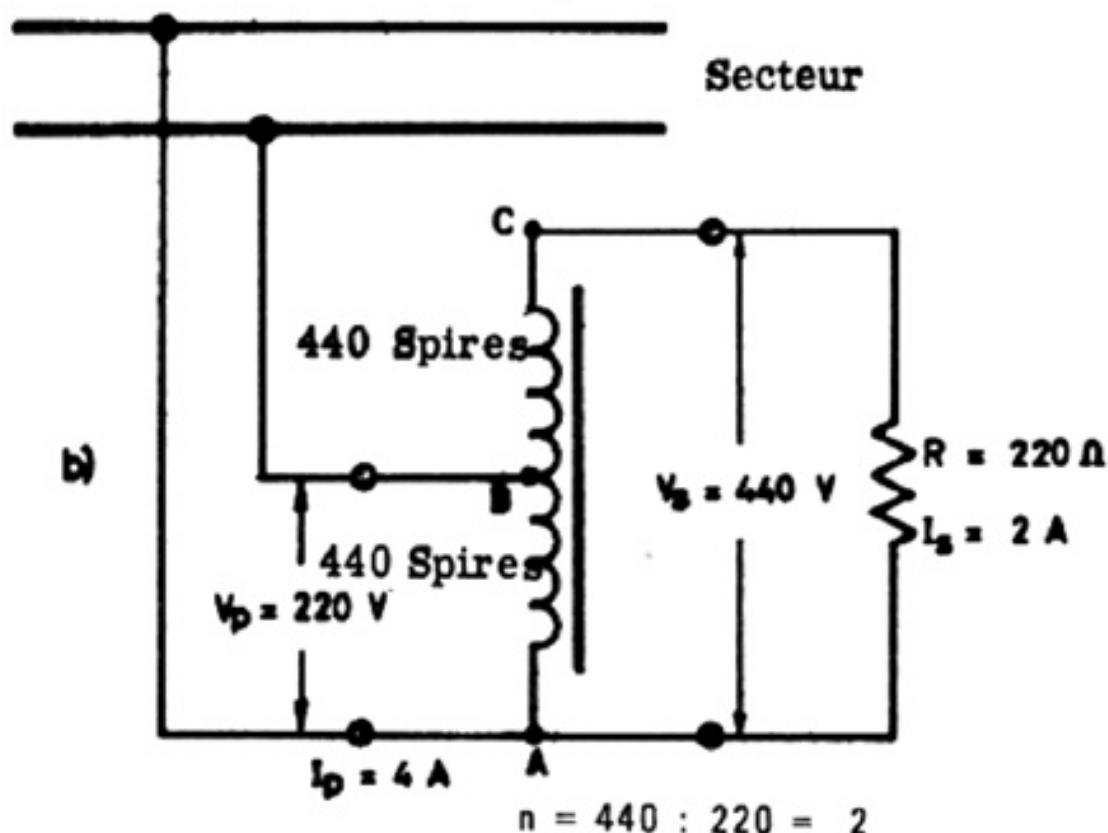
La seule différence avec le transformateur consiste dans le fait que certaines spires primaires servent aussi de spires secondaires et sont donc parcourues et par le courant primaire, et par le courant secondaire.

Etudions maintenant l'autotransformateur élévateur de tension, dont la constitution est montrée sur la *figure 10 - a*, tandis que sur la *figure 10 - b* on peut voir comment les extrémités A et C de l'enroulement et la prise intermédiaire B sont reliées au secteur et à la charge.

a)



b)



AUTOTRANSFORMATEUR ELEVATEUR DE TENSION

Figure 10

Dans ce cas la tension du secteur est appliquée aux 440 spires comprises entre l'extrême A et la prise B, car, en supposant encore que le flux induise dans chacune de ces spires une f. e. m. de 0,5 V, on obtient entre ces points une f. e. m. de $440 \times 0,5 = 220$ V, justement égale à la tension du secteur.

Nous devons observer que les lignes d'induction, en se fermant à travers le noyau, embrassent par l'enroulement entier disposé autour de celui-ci et donc les 440 autres spires comprises entre la prise B et l'extrême C : dans chacune de ces spires une f. e. m. de 0,5 V est donc induite, et entre ces points on obtient donc une f. e. m. de $440 \times 0,5 = 220$ V.

Entre les extrémités A et C de l'enroulement, on obtient donc une f. e. m. de $220 + 220 = 440$ V, qui permet de faire circuler le courant de $2A$ dans la résistance de 220Ω reliée à ces mêmes extrémités.

Nous voyons donc qu'avec cet autotransformateur on peut doubler la tension du secteur, de 220 V à 440 V, comme on le fait avec le transformateur de la figure 6 - a.

On applique maintenant la tension du secteur à une partie de cet enroulement dont on obtient la tension de la charge : les 880 spires comprises entre les extrémités A et C, où l'on obtient la tension de la charge, peuvent donc être considérées comme des spires secondaires, tandis que les 440 spires comprises entre l'extrême A et la prise B, à laquelle est appliquée la tension du secteur peuvent être considérées comme des spires primaires.

Ainsi, pour l'autotransformateur élévateur de tension, l'on peut dire qu'entre le nombre de spires primaires et secondaires et entre les tensions et courants correspondants s'appliquent les mêmes relations que celles que nous avons trouvées pour le transformateur ; dans ce cas nous pouvons également appeler *RAPPORT DE TRANSFORMATION DE L'AUTOTRANSFORMATEUR* le nombre obtenu en divisant la tension délivrée par le secondaire par la tension appliquée au primaire.

La seule différence par rapport au transformateur consiste dans le fait que certaines spires secondaires servent également de spires primaires et sont donc parcourues et par le courant primaire et par le courant secondaire.

Pour l'autotransformateur élévateur de tension on vérifie donc le fait déjà étudié pour l'autotransformateur réducteur de tension, c'est-à-dire que, dans la partie d'enroulement comprise entre la prise intermédiaire B et l'extrême A, circulent soit le courant primaire soit le courant secondaire.

Ces deux courants se comportent comme nous l'avons déjà vu pour le transformateur, en produisant deux f. m. m. et donc deux flux d'induction égaux et opposés ; pour cela les courants doivent circuler en sens contraire, c'est-à-dire que, tandis que l'un est dirigé, par exemple, de la prise intermédiaire B vers l'extrémité A, l'autre est dirigé de l'extrémité A vers la prise B et vice-versa.

En réalité, dans la partie d'enroulement comprise entre la prise B et l'extrémité A, circule un courant égal à la différence entre les courants primaire et secondaire ; si ces courants ont une intensité peu différente, le courant qui résulte de leur différence a une intensité réduite.

On peut donc réaliser cette partie d'enroulement avec un conducteur d'une section plus petite que le reste de l'enroulement ; il est ainsi parcouru par un courant d'intensité réduite qui donne lieu à une dissipation de puissance plus faible.

Nous voyons aussi que l'autotransformateur ne possède pas d'enroulement secondaire, et nous pouvons en conclure que cet appareil présente un volume moins encombrant, moins lourd et aussi moins coûteux qu'un transformateur de puissance égale.

De plus, un autotransformateur permet aussi d'économiser une partie de la matière ferromagnétique nécessaire à son noyau.

En effet la puissance qu'un transformateur fournit à la charge doit être entièrement transportée du circuit primaire au circuit secondaire par l'intermédiaire du flux d'induction, car c'est le seul élément que ces deux circuits ont en commun.

Dans le cas de l'autotransformateur, au contraire, ces deux circuits ont également en commun la partie d'enroulement comprise entre la prise B et l'extrémité A, et aussi la puissance relative à cet espace, qu'il ne faut donc pas transformer en faisant varier la tension et par conséquent le courant.

L'autotransformateur ne transforme en effet que la puissance relative à la partie d'enroulement comprise entre la prise B et l'extrémité C en la transportant, par l'intermédiaire du flux d'induction, jusqu'à la partie d'enroulement comprise entre la prise B et l'extrémité A, auquel est reliée la charge.

Cette puissance est aussi appelée *PUISANCE TRANSFORMEE* et on la calcule en multipliant la tension qui existe entre les points B et C par

le courant qui parcourt l'espace d'enroulement compris entre ces mêmes points.

Par exemple, pour l'autotransformateur de la *figure 9*, on obtient entre B et C une tension de $220 - 44 = 176$ V, tandis que l'intensité du courant est de 0,4 A, et que la puissance transformée est donc de : $176 \times 0,4 = 70,4$ W.

Puisque la charge réclame une puissance de $44 \times 2 = 88$ W, cela veut dire que la puissance de $88 - 70,4 = 17,6$ W passe directement du primaire au secondaire.

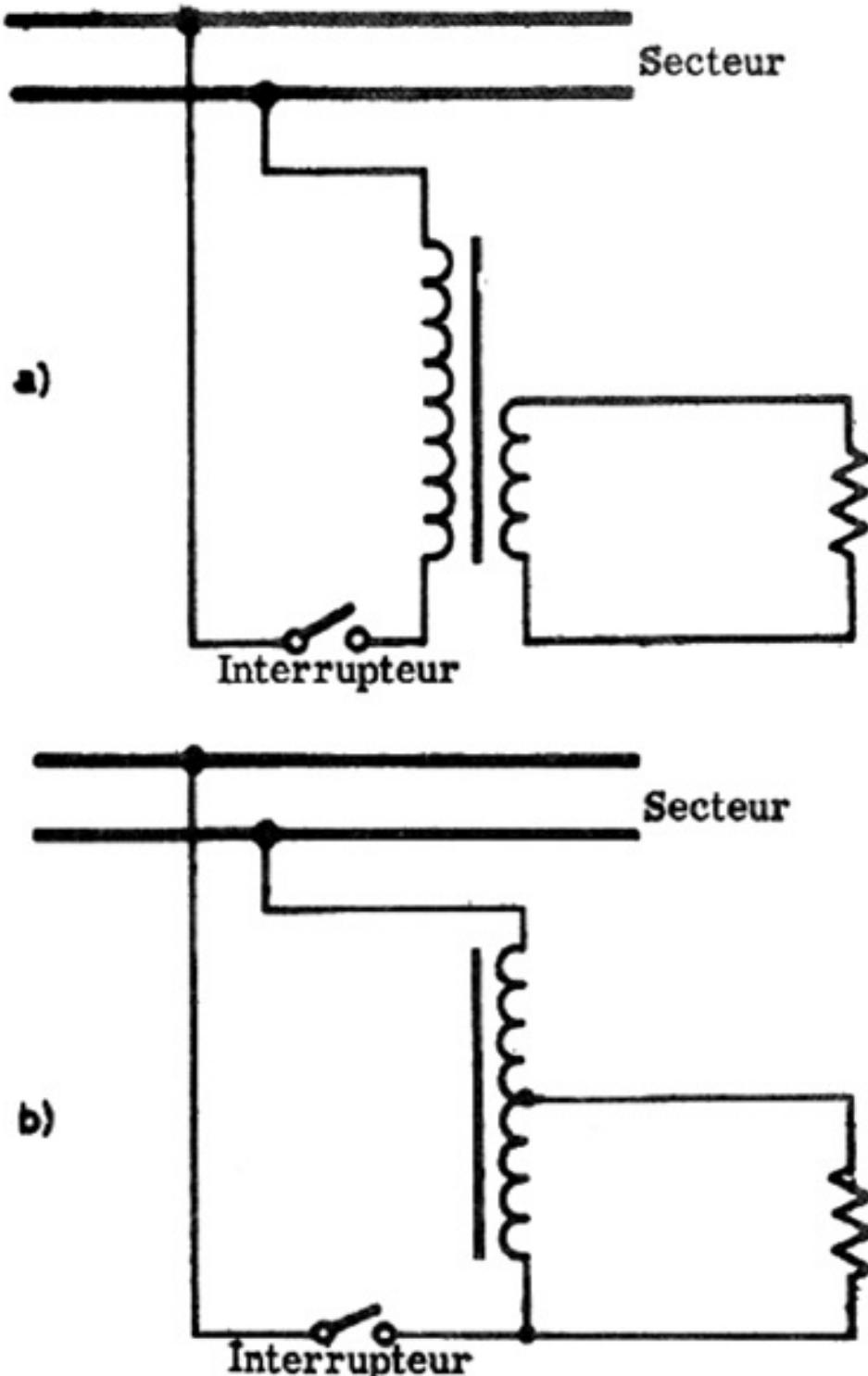
Nous voyons donc que, tandis que dans le cas d'un transformateur il aurait fallu calculer la section du noyau d'après la puissance totale de 88 W, on peut calculer la section du noyau de l'autotransformateur d'après la puissance transformée qui n'est que de 70,4 W, le noyau est donc de dimensions plus réduites, même si c'est de peu.

On pourrait obtenir une réduction plus importante des dimensions du noyau de l'autotransformateur de la *figure 10* : en effet, puisqu'entre B et C on a la tension de $440 - 220 = 220$ V, avec un courant d'intensité de 2 A, la puissance transformée est de $220 \times 2 = 440$ W, c'est-à-dire la moitié de la puissance totale réclamée par la charge, qui est de $440 \times 2 = 880$ W.

Ces exemples nous montrent que la puissance transformée diminue par rapport à la puissance totale réclamée par la charge quand les spires comprises entre la prise B et l'extrémité A augmentent par rapport à celles de l'enroulement entier. En effet, tandis que sur l'autotransformateur de la *figure 9* les spires comprises entre ces deux points ne forment que le cinquième des spires de l'enroulement entier, sur l'autotransformateur de la *figure 10* les spires comprises entre ces points forment au contraire la moitié des spires de l'enroulement entier.

L'augmentation des spires comprises entre les points A et B par rapport à celles de l'enroulement entier a donc l'avantage de réduire les dimensions du noyau par suite de la diminution de la puissance transformée. De plus, comme nous l'avons vu précédemment, les spires comprises entre les points A et B sont enroulées avec un conducteur de petite section, et quand elles augmentent, on obtient une plus grande économie de la matière non seulement dans la construction du noyau, mais aussi dans l'exécution de l'enroulement.

Nous observons enfin que, si l'on augmente les spires comprises entre



TRANSFORMATEUR ET AUTOTRANSFORMATEUR A PRIMAIRE OUVERT

Figure 11

A et B par rapport à l'ensemble des spires, la différence entre la tension primaire et la tension secondaire diminue, c'est-à-dire que le rapport de transformation se rapproche de plus en plus de 1 ; ce rapport serait égal à 1 si la tension primaire était égale à la tension secondaire.

Nous pouvons donc conclure que *l'autotransformateur est d'autant plus avantageux par rapport au transformateur que son rapport de transformation est plus voisin de 1.*

Mais l'autotransformateur a également un désavantage par rapport au transformateur ; on peut s'en rendre compte en étudiant la *figure 11* où ces deux éléments sont représentés reliés au secteur par l'intermédiaire d'un interrupteur.

Comme on le voit sur la *figure 11 - a*, le circuit secondaire du transformateur n'est pas relié au secteur ; il n'est donc pas sous tension quand on ouvre l'interrupteur pour en interrompre le fonctionnement.

Au contraire, le circuit secondaire de l'autotransformateur (*figure 11 - b*) est relié au secteur par l'intermédiaire de l'enroulement ; quand on ouvre l'interrupteur, le circuit reste relié à l'un des conducteurs de secteur et se trouve donc sous tension.

Quand l'autotransformateur alimente un appareil, tous les circuits de celui-ci sont montés sur un châssis métallique auquel, généralement, est reliée une extrémité de l'autotransformateur.

Le châssis est donc sous tension et, si on le touche, on peut recevoir une secousse électrique même quand l'appareil est éteint. Dans ces cas, pour éviter de recevoir des secousses désagréables, on doit détacher la prise du secteur avant de toucher le châssis.

Depuis le début du cours, nous avons vu les RESISTANCES, les CONDENSATEURS, les BOBINAGES, les TRANSFORMATEURS et les AUTOTRANSFORMATEURS, c'est-à-dire les COMPOSANTS PASSIFS fondamentaux.

Dans les prochaines leçons, nous aborderons l'étude des COMPOSANTS ACTIFS (tubes électroniques et Transistors) et pourrons par la suite étudier les CIRCUITS ELECTRONIQUES, sur lesquels sont montés tous ces composants.

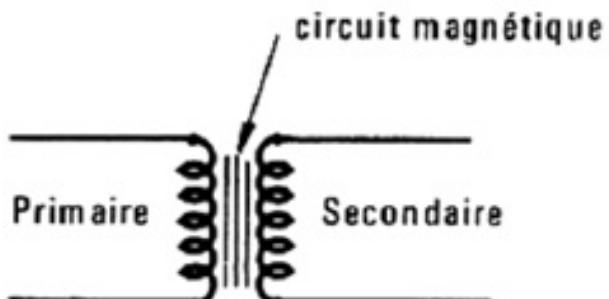
Toutefois, dans la prochaine leçon théorique, nous introduirons un chapitre spécial de caractère général : les MESURES ELECTRIQUES, qui intéressent tous les domaines de l'Electronique.

NOTIONS A RETENIR

- Un **TRANSFORMATEUR** est un appareil **STATIQUE à INDUCTION**, destiné à **TRANSFORMER UN COURANT ALTERNATIF** en un autre **COURANT ALTERNATIF, D'INTENSITE ET DE TENSION** différentes.

Les termes "appareils **STATIQUES**" signifient que cette transformation s'effectue sans l'intermédiaire de pièces ou d'organes en mouvement.

- Dans le cas le plus simple, un **TRANSFORMATEUR** comprend un **PRIMAIRE** et un **SECONDAIRE**, c'est-à-dire **DEUX ENROULEMENTS**, bobinés sur un **CIRCUIT MAGNETIQUE**.



- En négligeant les **PERTES** (relativement faibles) on peut dire qu'un **TRANSFORMATEUR TRANSFERE AU SECONDAIRE, TOUTE LA PUISSANCE ABSORBEE DANS LE PRIMAIRE**.

ATTENTION : il s'agit bien d'un **TRANSFERT DE PUISSANCE** ; il ne faut donc pas croire que le **SECONDAIRE** peut délivrer plus de puissance que le **PRIMAIRE**. **LA TENSION SECONDAIRE** peut être 2-3-4 etc ... fois plus élevée que celle appliquée au **PRIMAIRE**, mais la **PUISSANCE RESTE LA MEME**.

EXEMPLE : LE PRIMAIRE D'UN **TRANSFORMATEUR** est alimenté par une **TENSION** de 220 Volts et peut supporter un **COURANT DE 2 AMPERES**.

Dans ces conditions, si la TENSION délivrée par le secondaire est de 440 Volts, le COURANT MAXIMUM ne pourra dépasser 1 AMPERE.

On aura ainsi :

PUISANCE PRIMAIRE : $P = UI = 220 \times 2 = 440$ watts

PUISANCE SECONDAIRE : $P = UI = 440 \times 1 = 440$ watts

LE RAPPORT DE TRANSFORMATION est donné par la formule.

$n = N_2/N_1$, avec

n = Rapport de transformation

N_2 = Nombre de spires au secondaire

N_1 = Nombre de spires au primaire

On peut également écrire : $U_2/U_1 = N_2/N_1 = n$ et $I_2/I_1 = N_1/N_2$, le rapport de transformation restant toujours : N_2/N_1 .

CONCLUSION : Si le primaire d'un transformateur comporte 500 spires et le secondaire 1000 spires, LE RAPPORT DE TRANSFORMATION sera de $N_2/N_1 = 1000/500 = 2$.

Cela signifie que la TENSION délivrée par le secondaire sera égale à $U_1 \times 2$.

Exemple : Tension primaire : 100 Volts

 Tension secondaire : $100 \times 2 = 200$ Volts

Par contre si le primaire comporte plus de spires que le secondaire, par exemple :

Primaire = 2000 spires

Secondaire = 1000 spires

le rapport de transformation sera $N_2/N_1 = 1000/2000 = 0,5$.

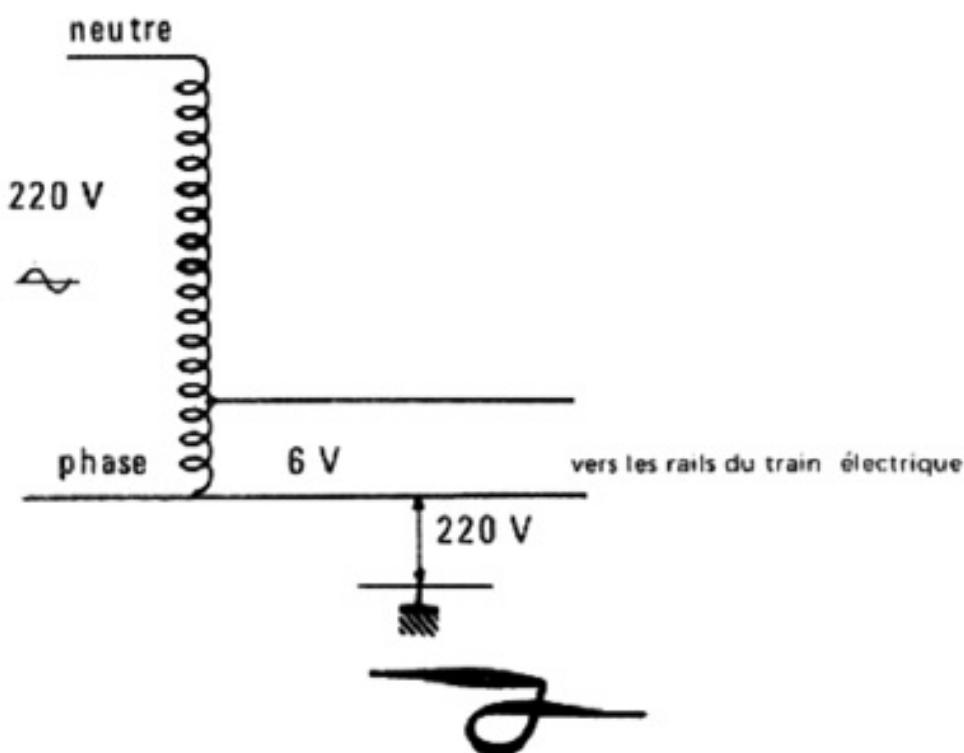
La tension délivrée par le secondaire sera égale à $U_1 \times 0,5$.

Exemple : Tension primaire : 220 Volts
 Tension secondaire : $220 \times 0,5 = 110$ Volts

- L'AUTOTRANSFORMATEUR se comporte comme un TRANSFORMATEUR et le RAPPORT DE TRANSFORMATION se calcule de la même façon.

Il est moins encombrant, moins lourd et moins coûteux qu'un transformateur, mais présente l'inconvénient de ne pas isoler du secteur, l'appareil qu'il alimente.

Cet inconvénient est relativement grave, car dans le cas d'une alimentation par AUTOTRANSFORMATEUR d'un jouet d'enfant (un train électrique par exemple), il existe toujours entre les rails et la TERRE, une tension, qui suivant le sens de branchement de la prise-secteur, peut atteindre la valeur de la tension-secteur, donc être dangereuse (voir figure ci-dessous).



EXERCICE DE REVISION SUR THEORIE 11

- 1 - Comment s'appellent les deux enroulements d'un transformateur ?**
- 2 - Dans quelles conditions un transformateur fonctionne-t-il à vide ?**
- 3 - Un transformateur peut-il fonctionner avec le courant continu ?**
- 4 - Comment obtient-on le rapport de transformation d'un transformateur ?**
- 5 - Quelle relation y-a-t-il entre le rapport de transformation et le nombre de spires des enroulements d'un transformateur ?**
- 6 - Qu'entend-on par primaire universel ?**
- 7 - Qu'est-ce que le courant de charge d'un transformateur ?**
- 8 - Pourquoi le noyau des transformateurs est-il formé de petites tôles isolées entre elles ?**
- 9 - Qu'est-ce que l'induction ?**
- 10 - Dans quelles conditions l'autotransformateur est-il particulièrement plus avantageux que le transformateur ?**



REPONSES A L'EXERCICE DE REVISION SUR THEORIE 10

- 1 - L'obstacle opposé au courant par une bobine avec résistance, s'appelle l'impédance.
- 2 - 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.
- 3 - L'unité de mesure de l'impédance électrique est l'ohm.
- 4 - Les noyaux de types fermés que l'on utilise normalement sont ceux à colonnes et cuirassé ou en E. I.
- 5 - On dit qu'un noyau ferromagnétique est plus perméable que l'air aux lignes d'induction parce qu'il est traversé par ces lignes plus facilement que l'air.
- 6 - Le flux dispersé est l'ensemble des lignes d'induction qui se ferment à travers l'air à l'extérieur du noyau ferromagnétique.
- 7 - Le circuit magnétique est l'ensemble constitué par un enroulement et par le noyau ferromagnétique correspondant.
- 8 - La réductance magnétique indique le nombre d'ampère-tours nécessaires pour obtenir un flux d'induction de 1 Wb dans le noyau.
- 9 - On calcule la réductance d'un circuit magnétique en divisant sa longueur par sa section et par la perméabilité absolue de la matière qui constitue le noyau.
- 10 - On peut dire qu'un noyau est saturé quand le flux d'induction qui le traverse n'augmente plus sensiblement lorsque la f. m. m. augmente.

