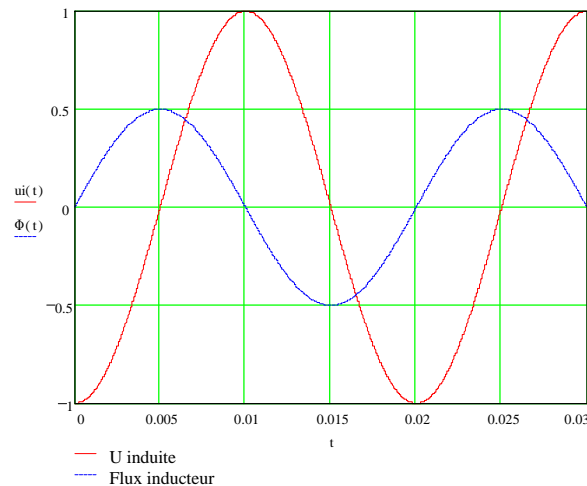


## 11 Transformateurs monophasés

### 11.1 Tension induite dans une bobine.

Soit une bobine entourant un flux qui varie sinusoidalement à une fréquence  $f$  [Hz], atteignant périodiquement des valeurs positives ( $\Phi_{MAX}$ ) et négatives ( $-\Phi_{MAX}$ ).



Ce flux induit entre les bornes de la bobine, une tension alternative donnée par l'équation :

$$U_i = 4,44 \cdot f \cdot N \cdot \Phi_{MAX} \text{ [V]}$$

$N$  : Nombre de spires [-]

$f$  : fréquence [Hz]

$\Phi_{MAX}$  : Flux magnétique de crête [Wb]

4,44 : Constante (valeur exacte =  $\pi \cdot \sqrt{2}$ )

L'équation ci-dessus découle de la loi de Faraday et de la loi de LENZ pour le signe négatif

$$U_i = -N \cdot \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \text{ [V]} \text{ où } \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \text{ est le taux de variation de flux.}$$

Ainsi dans le graphique ci-dessus :

lorsque  $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$  est positif, le flux augmente et la tension induite est positive.

Lorsque le flux diminue,  $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$  est négatif, et la tension induite est négative.

Enfin au moment où  $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$  est nul, la tension induite est nulle.

#### Exemple :

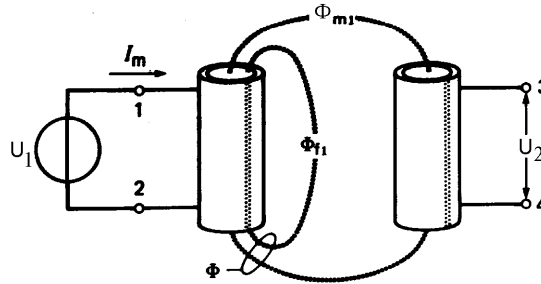
Une bobine de 4000 spires entoure un flux alternatif d'une fréquence de 60 [Hz], dont la valeur de crête est de 2 milliWebers . Calculer la valeur de la tension induite.

#### Solution :

$$U_i = 4,44 \cdot f \cdot N \cdot \Phi_{MAX} = 4,44 \cdot 60 \cdot 4000 \cdot 0,002 = 2131 \text{ [V]}$$

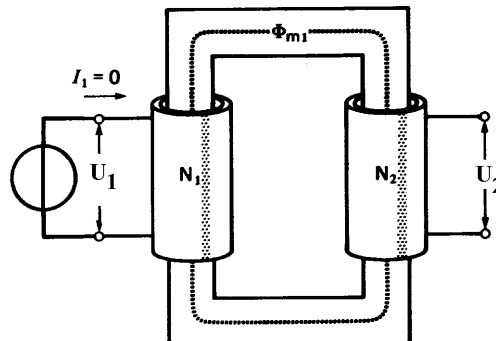
## 11.2 Transformateur élémentaire

On alimente une bobine à noyau d'air par une source de tension alternative  $U_1$  [V]. Le courant magnétisant  $I_m$  [A] produit un flux total  $\Phi$  [Wb] qui est dispersé autour de l'enroulement. Si l'on approche de ce montage une deuxième bobine, une partie du flux  $\Phi$  [Wb] est captée par les spires de cette deuxième bobine et une faible tension induite  $U_2$  [V] est présente à ses bornes.



Il existe une tension seulement entre les bornes 1-2 du primaire et les bornes 3-4 du secondaire. Il n'existe aucune tension entre une des bornes primaires et secondaires. Il s'ensuit que le secondaire est électriquement isolé du primaire.

Comme le flux transmis au secondaire est faible, il a fallu trouver un moyen d'améliorer ce couplage. Par l'utilisation d'un noyau ferromagnétique, dont le but est de concentrer le flux magnétique, on évite ainsi la dispersion du flux généré par la bobine primaire.



### 11.3 Définition

Un transformateur est un appareil statique, basé sur le phénomène de l'induction électromagnétique  $\vec{B}$ . Il permet de convertir l'énergie électrique alternative  $W$  [J] en une énergie de même nature. Ce transfert d'énergie peut se faire avec des niveaux de tensions ou de courants différents. Usuellement, nous parlons d'appareil avec séparation galvanique, ce qui signifie : sans aucune liaison électrique entre les 2 circuits (primaire et secondaire).

### 11.4 Utilisations du transformateur

Dans les réseaux de distribution électrique, le but est de transférer de l'énergie électrique  $W$ [J] avec le moins de pertes possibles entre la centrale et le consommateur.

Les pertes sont dues essentiellement à l'EFFET JOULE. Elles sont proportionnelles au carré de l'intensité du courant électrique  $I$ .

$$W_J = R \cdot I^2 \cdot t \text{ [J]}$$

Au moyen d'un transformateur, il est possible de modifier les grandeurs électriques et de diminuer ces pertes.

Exemple:

Une petite centrale au fil de l'eau alimente une maison individuelle par un circuit monophasé. La tension de l'alternateur est de 4 [kV]. La puissance apparente  $S$  demandée est de 2 [kVA]. La résistance de la ligne  $R$  est de 10 [ $\Omega$ ]. Allez-vous imposer une tension d'alimentation de 110 [V] ou de 230 [V] ?

Nous devons installer un transformateur pour abaisser la tension électrique de 4 [kV] à 230 [V], ou à 110 [V].

Calculons les pertes Joule pendant une heure.

Données:

$$S = 2 \text{ [kVA]} \quad U_{\text{alternateur}} = 4 \text{ [kV]} \quad U_{\text{récepteur 1}} = 110 \text{ [V]} \quad U_{\text{récepteur 2}} = 230 \text{ [V]}$$

Inconnues:

Pertes Joule pendant une heure les plus petites possibles = ?

Relation :

$$W_J = R \cdot I^2 \cdot t \text{ [J]}$$

$$S = U \cdot I \text{ [VA]}$$

Application numérique :

$$W_J = R \cdot \left( \frac{S}{U_{\text{récepteur}}} \right)^2 \cdot t \text{ [J]} \text{ et } 1[\text{J}] = 1[\text{Ws}]$$

Conclusion :

Si  $U = 110$  [V] ;  $W_J = 3305.79$  [Wh] et si  $U = 230$  [V] ;  $W_J = 756.14$  [Wh]

Nous pouvons comprendre l'importance du transformateur. Le distributeur doit toujours améliorer le rendement de son réseau. Ces pertes ne sont pas facturées au client.

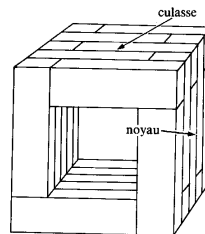
## 11.5 Exemples d'utilisations

Les transformateurs sont utilisés dans les domaines suivantes:

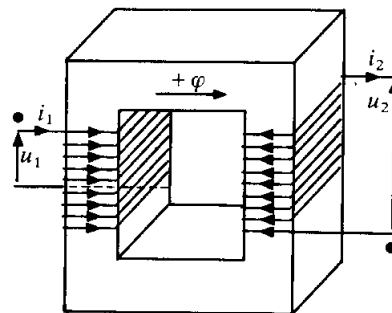
- Distribution industrielle modification de la tension
- Radio-TV alimentation tube image
- Sécurité : transformateur de séparation galvanique
- Adaptation de l'impédance en télécommunication (translateur)
- Réglage de la tension pour poste à souder
- Mesure - transformateur de courant TI ou de tension TP
- Petit appareil-luminaire.

## 11.6 Constitution

Un transformateur comprend un circuit magnétique constituée d'un noyau ferromagnétique. (voir caractéristiques magnétiques : volume 2)



Ce circuit est constitué de plusieurs tôles d'acier au silicium laminées. Ces tôles sont recouvertes d'un vernis isolant afin de diminuer les pertes par courant de Foucault. (voir chapitre 7.3)



Le circuit ferromagnétique comporte 2 bobinages (en monophasé) dont le nombre de spires sont respectivement  $N_1$  et  $N_2$ .

La notation des grandeurs de la bobine primaire se notent par l'indice 1. En ce qui concerne les grandeurs de la bobine secondaire, elles se notent par l'indice 2.

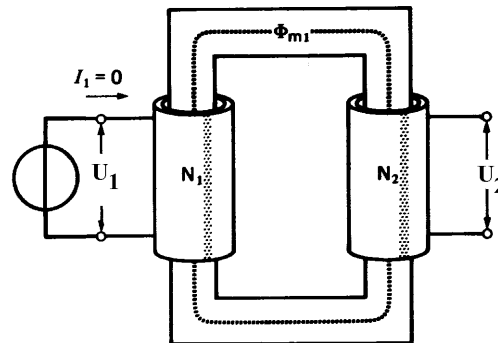
La bobine qui est alimentée s'appelle « bobine primaire », l'autre bobine s'appelle « bobine secondaire ».

## 11.7 Transformateur idéal

Dans sa forme idéale, les bobines du transformateur ne possèdent pas de résistance  $R$  et le circuit magnétique ne présente aucune réluctance  $\mathfrak{R}$ . Donc, pas de pertes et son noyau est infiniment perméable et n'a pas de dispersion de flux.

Une tension sinusoïdale  $U_1$  est appliquée aux bornes de l'enroulement  $N_1$  (primaire) fait apparaître dans le noyau un flux magnétique sinusoïdal  $\Phi$ .

Le transformateur idéal ne présente pas de fuites magnétiques. La grandeur commune aux 2 enroulements est le flux magnétique  $\Phi$ . Ce flux magnétique  $\Phi$  est déphasé de  $90^\circ$  par rapport à la tension  $U_1$ .



## 11.8 Rapport de transformation

On peut écrire les équations suivantes :

$$\Phi_1 = \Phi_2$$

$$U_1 = 4,44 \cdot f \cdot N_1 \cdot \Phi_{\text{MAX}} \text{ [V]}$$

$$U_2 = 4,44 \cdot f \cdot N_2 \cdot \Phi_{\text{MAX}} \text{ [V]}$$

Des équations ci-dessus on tire l'expression du rapport de transformation d'un transformateur. Le rapport de transformation  $m$  exprime la relation entre la tension  $U_1$  et la tension  $U_2$  d'un transformateur. Ce rapport ne possède pas d'unité.

$$m = \frac{N_1}{N_2} \text{ mais nous savons que } m = \frac{U_1}{U_2} [-]$$

réécrivons le tout

$$\boxed{m = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2}}$$

**Exemple:**

Un transformateur idéal est construit pour une tension primaire de 18 [kV]. Le nombre de spires au secondaire est 4000. Le rapport de transformation est de 45. Calculez le nombre de spires du primaire et la tension au secondaire.

Données:

transformateur idéal

$$U_1 = 18 \text{ [kV]} \quad N_2 = 4000 \quad m = 45$$

Inconnues:

$$U_2 = ? \quad N_1 = ?$$

Relation

$$m = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2}$$

$$U_2 = \frac{U_1}{m}$$

$$N_1 = N_2 * m$$

Application numérique

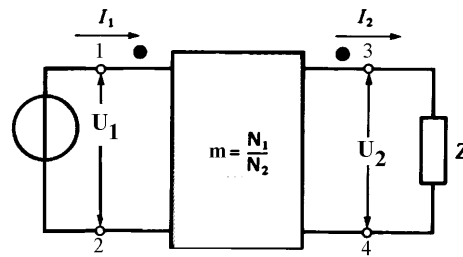
$$U_2 = \frac{18000}{45} = 400 \text{ [V]}$$

$$N_1 = 4000 * 45 = 180000 \text{ spires}$$

**Exercice:**

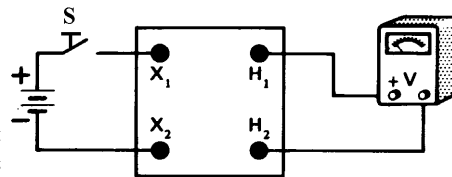
Un transformateur idéal possède 40 spires au secondaire. Nous demandons au constructeur d'augmenter ce nombre de spires de 20. Que pouvez-vous dire de la tension au secondaire du transformateur modifié par rapport à l'ancien ?

## 11.9 Polarité d'un transformateur



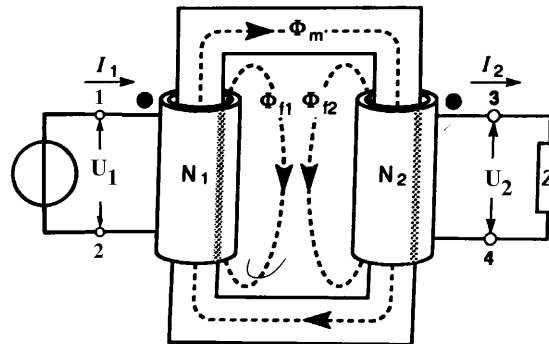
Supposons qu'au moment où les tensions atteignent leur maximum, la borne 1 soit positive par rapport à la borne 2, et que la borne 3 soit positive par rapport à la borne 4. On dit alors que les bornes 1 et 3 possèdent la même *polarité*. On l'indique en plaçant un point noir vis-à-vis la borne 1 et un autre près de la borne 3. Ces points sont appelés *marques de polarité*.

On peut réaliser un test de polarité d'un transformateur de la manière suivante :



On raccorde une pile de 1,5 [V] aux bornes basse tension du transformateur à travers un poussoir S. Lors de la fermeture (une seule impulsion) du poussoir, une tension est induite dans le secondaire. Si à cet instant l'aiguille du voltmètre dévie dans le bon sens, la borne du transformateur reliée à la borne positive du voltmètre est marquée H<sub>1</sub> et l'autre est marquée H<sub>2</sub>. Quant aux bornes à basse tension, celle qui est reliée au pôle positif de la pile se nomme X<sub>1</sub> et l'autre X<sub>2</sub>.

### 11.10 Transformateur idéal en charge



Le calcul du courant au secondaire se réalise de la façon suivante :

$$I_2 = \frac{U_2}{Z} [\text{A}]$$

Dans un transformateur idéal, le primaire et le secondaire sont couplés par le flux  $\Phi_M$  [Wb] seulement. Par conséquent, le rapport de transformation en charge est le même qu'à vide, soit :

$$m = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2}$$

Le courant  $I_2$  [A] produit une solénaion  $\Theta_2 = N_2 I_2$  [Atours] (voir magnétisme volume 2). Si elle agissait seule, cette solénaion produirait un changement majeur dans le flux  $\Phi_M$  [Wb]. Mais comme la loi de LENZ stipule :

« La polarité de la tension induite est telle qu'elle tend à faire circuler un courant dont le flux s'oppose à la variation du flux inducteur à l'intérieur d'une bobine »

Le primaire du transformateur crée, à tout instant, une solénaion  $\Theta_1 = N_1 I_1$  [Atours] d'égale valeur mais opposée à  $\Theta_2 = N_2 I_2$  [Atours]. Ainsi le courant au primaire doit respecter la relation :

$$N_1 \cdot I_1 = N_2 \cdot I_2$$

### 11.11 Rapport des courants

De l'équation précédente on tire :

$$\boxed{\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1}}$$

En comparant l'équation précédente à l'équation du rapport de transformation, on constate que le rapport des courants est l'inverse de celui des tensions. Autrement dit, ce que l'on gagne en tension, on le perd courant, et vice versa.



### 11.11.1 Exemple

Un transformateur idéal de polarité identique a 90 spires au primaire et 2250 spires au secondaire. Il est branché sur source alternative  $U = 200$  [V],  $f = 60$  [Hz]. La charge absorbe un courant de 2 [A] pour un facteur de puissance de 80 %, inductif. Tracer le diagramme vectoriel.

Rapport de transformation

$$m = \frac{N_1}{N_2} = \frac{90}{2250} = 0,04$$

$$U_2 = \frac{U_1}{m} = \frac{200}{0,04} = 5000 \text{ [V]}$$

$$I_1 = \frac{I_2}{m} = \frac{2}{0,04} = 50 \text{ [A]}$$

Comme le facteur de puissance est de 0.8 en retard,  $I_2$  est donc en retard d'un angle de :

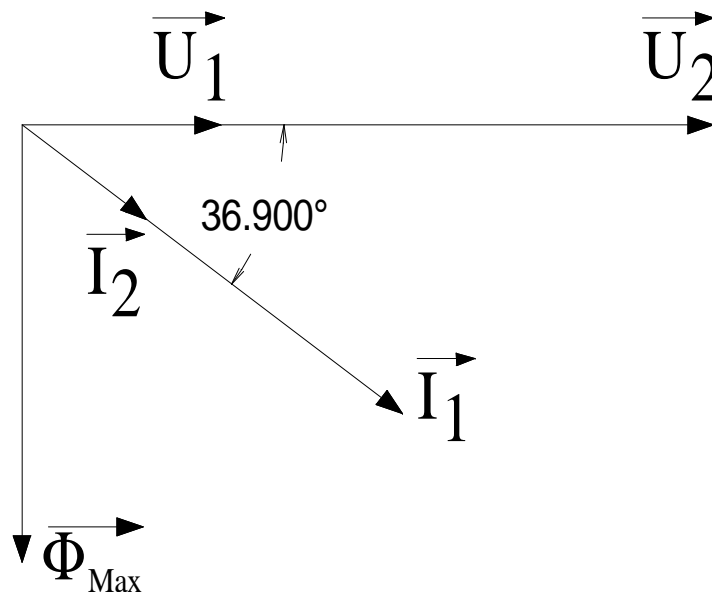
$$\varphi = \arccos 0,8 = 36,9^\circ$$

La valeur de crête du flux est :

$$\Phi_{\text{MAX}} = \frac{U_1}{4,44 \cdot f \cdot N_1} = \frac{200}{4,44 \cdot 60 \cdot 90} = 8,34 \text{ [mWb]}$$

Le vecteur du flux  $\vec{\Phi}_{\text{MAX}}$  est de  $90^\circ$  en arrière de  $\vec{U}_1$ .

En prenant  $\vec{U}_1$  comme vecteur de référence on obtient le diagramme vectoriel suivant :



### 11.12 Puissance apparente S du transformateur idéal monophasé.

La tension  $U_1$  appliquée au primaire engendre un courant  $I_1$ . Le produit de ces 2 grandeurs se nomme la puissance apparente  $S_1$ . Dans un transformateur idéal, cette puissance apparente  $S$  est constante entre le primaire et le secondaire. Nous pouvons donc écrire que dans ce cas:

$$S_1 = S_2$$

mais nous connaissons la relation suivante  $S = U \cdot I$  [VA]

ce qui nous donne la relation  $U_1 \cdot I_1 = U_2 \cdot I_2$

Le rapport de transformation  $m$  peut être exprimé à l'aide des courants

$$m = \frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1}$$

#### Exemple:

Un transformateur idéal possède une tension primaire de 18 [kV]. La tension secondaire est de 400 [V]. Sachant que sa puissance apparente est de 450 [kVA], calculez les courants primaire et secondaire de ce transformateur.

Données:

$$U_1 = 18 \text{ [kV]} \quad U_2 = 400 \text{ [V]} \quad S = 450 \text{ [kVA]}$$

Inconnues:

$$I_1 = ? \quad I_2 = ?$$

Relations:

$$S_1 = S_2 \text{ car transformateur idéal} \quad S = U \cdot I \text{ [VA]}$$

$$m = \frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1}$$

Analyse:

$$I_1 = \frac{S}{U_1} \text{ [A]}$$

$$I_2 = \frac{U_1 \cdot I_1}{U_2} \text{ [A]}$$

$$I_1 = \frac{450000}{18000} = 25 \text{ [A]}$$

$$I_2 = \frac{18000 \cdot 25}{400} = 1125 \text{ [A]}$$

### 11.13 Grandeurs nominales du transformateur réel

Les grandeurs nominales telles que puissance apparente  $S$  [VA], fréquence  $f$  [Hz], courants, tensions, etc. sont indiquées sur la plaquette signalétique.

Exemple de plaquette :

Nennleistung 20 [kVA]	
Nennspannung 6000 / 230 [V]	
Nennstrom 3.44 / 87 [A]	
Frequenz 50 [Hz]	Nr 123456
Baujahr 1992	Typ S123

La puissance nominale  $S$  est donnée aux bornes du secondaire du transformateur. Elle est donnée en [VA] ou en [kVA].

La tension primaire  $U_1$  [V] nominale correspond à la valeur d'alimentation du transformateur.

La tension secondaire  $U_2$  [V] nominale correspond à la valeur mesurée aux bornes de l'enroulement secondaire à vide (circuit ouvert sans charge).

Les courants primaire et secondaire nominaux correspondent aux valeurs calculées selon la puissance  $S$  nominale et tensions nominales, avec un rendement  $\eta$  nominal et une température  $T$  nominale.

La fréquence  $f$  [Hz] nominale correspond à la valeur pour laquelle le transformateur est construit (résonance).

#### Remarque :

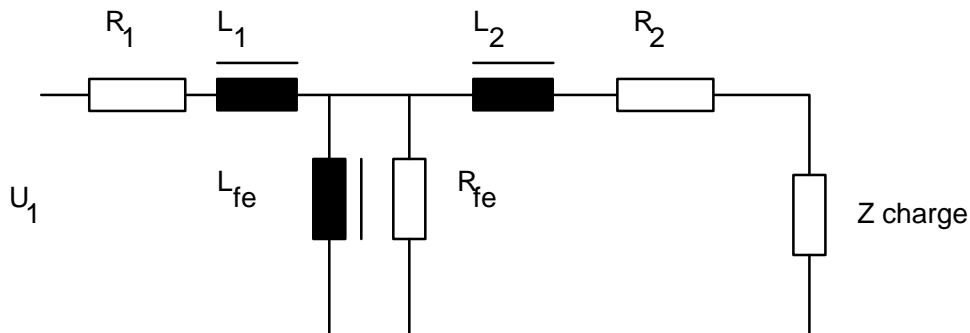
Traduction de

Nennleistung :	Puissance nominale.
Nennspannung :	Tension nominale.
Nennstrom :	Courant nominal.

La puissance d'un transformateur est toujours donnée en [VA] car on ne sait pas le genre de charge (résistive, capacitive ou inductive) que l'on va raccorder au secondaire.

## 11.14 Transformateur réel

Le transformateur réel possède une résistance  $R$  [ $\Omega$ ] et une inductance  $L$ [H]. De ce fait des pertes ohmiques et inductives existent.



Circuit primaire rapporté au secondaire

Les pertes ohmiques sont provoquées par l'effet Joule. Ce sont donc des pertes calorifiques.

Les pertes inductives sont provoquées par le circuit magnétique du transformateur et par la bobine. En pratique, le déphasage n'est pas de  $90^\circ$  mais il est dépendant de l'impédance de la charge. C'est le  $\cos \phi$ .

### 11.14.1 Conservation des puissances actives et réactives

$$U_1 I_1 \cos \phi_1 = (U_2 I_2 \cos \phi_2) + R_1 I_1^2 + R_2 I_2^2 + (U_1 I_0 \cos \phi_0)$$

$$U_1 I_1 \sin \phi_1 = (U_2 I_2 \sin \phi_2) + X_L I_1^2 + R_2 I_2^2 + (U_1 I_0 \sin \phi_0)$$

$I_0$  et  $\cos \phi_0$  signifie courant magnétisant.

Le courant magnétisant  $I_0$  est nécessaire de par le fait que la réluctance  $\mathfrak{R}$  n'est pas nulle. Ces relations sont parfois appelées théorème de Boucherot.

En charge, la puissance demandée par la charge connectée au secondaire se reporte au primaire.

La puissance active  $P$  [W] fournie au transformateur dépend du facteur de puissance du circuit sur lequel débite le secondaire. Comme la charge varie en fonction de l'utilisation du transformateur, la puissance du transformateur est donnée à l'aide de sa puissance apparente  $S$  exprimée en [VA].

## 11.15 Pertes et rendement du transformateur réel

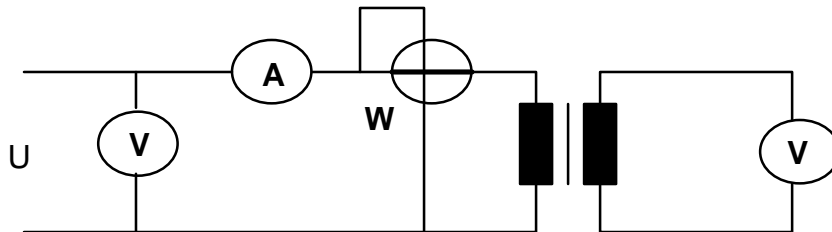
Les pertes d'un transformateur réel sont dues au circuit magnétique, appelées pertes fer  $P_{\text{fer}}$  et au cuivre constituant les bobines appelées pertes cuivre  $P_{\text{Cu}}$ . Il est possible de les mesurer.

### 11.15.1 Pertes fer

Les pertes fer sont fonction de la fréquence  $f$ , de la valeur et de la forme de la tension  $U_1[\text{V}]$  ainsi que de la nature des tôles du circuits magnétiques. (Hystérésis et Foucault).

$$P_{\text{Fe}} = P_{\text{luc}} - R_1 I_0^2 \text{ [W]} \quad \text{puissance lue sur le wattmètre } P_{\text{luc}}$$

Ces pertes fer sont constantes en fonction de la charge du transformateur. Elles sont mesurées par un *essai à vide* du transformateur.

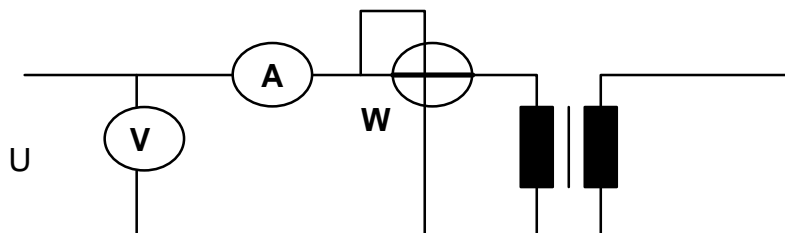


### 11.15.2 Pertes cuivre

Les pertes cuivre  $P_{\text{Cu}}$  sont dues à l'effet Joule dans les enroulements primaire et secondaire. Elles sont proportionnelles à la charge.

$$P_{\text{Cu}} = R_1 I_1^2 + R_2 I_2^2 \text{ [W]}$$

Les pertes cuivre  $P_{\text{Cu}}$  sont déterminée par un essai en *court-circuit* sous tension réduite, afin d'obtenir le courant nominal  $I_{\text{nom}}$ .



### 11.15.3 Rendement

Le rendement  $\eta$  du transformateur exprime le rapport entre la puissance active  $P_2$  et la puissance active  $P_1$ .

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{(P_2 + P_{Fe} + P_{Cu})}$$

Le rendement dépend de la charge. A faible charge, les pertes fer sont importantes par rapport aux pertes cuivre. A charge nominale, le rendement d'un transformateur peut être de 99% pour les transformateurs de grande puissance, de 95 à 98% pour les transformateurs moyens et de 80 à 92% pour les petits transformateurs.

Le rendement maximum d'un transformateur est atteint lorsque les pertes fer  $P_{Fe}$  sont égales aux pertes cuivre  $P_{Cu}$ .

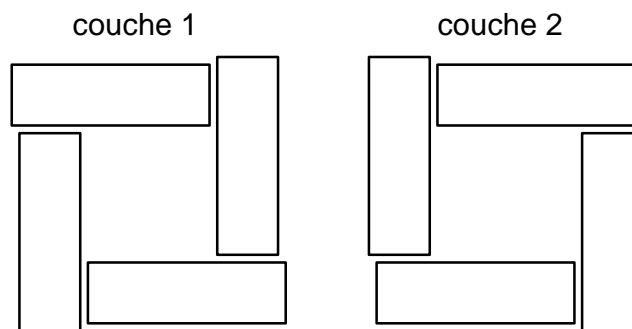
## 11.16 Circuit magnétique du transformateur réel

### 11.16.1 Formes de circuits magnétiques

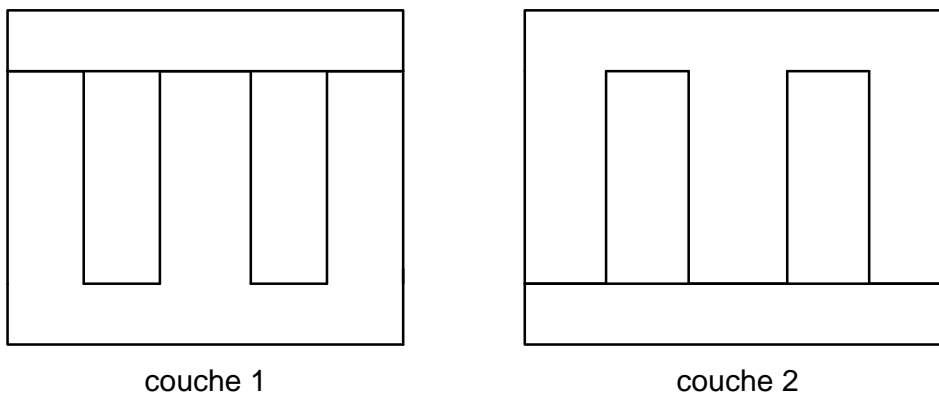
Le rôle du circuit magnétique est de canaliser le flux magnétique  $\Phi$  [Wb] et de présenter le minimum de pertes par Hystérésis et par courant de Foucault.

Ce circuit peut avoir différentes formes:

soit à 2 colonnes formées par un empilage de tôles décalées (couche 1 puis couche 2 et ainsi de suite)



soit de forme cuirassé, c'est-à-dire que les enroulements sont placés sur une colonne centrale et le flux magnétique  $\Phi$  [Wb] se referme par chacun des côtés qui forment la cuirasse.



La forme des tôles, selon les dimensions du circuit magnétique, peut être en E, en U, en L, en C ou en I, l'assemblage s'effectuant toujours en croisant les joints.

### 11.16.2 Section des colonnes

Si, pour les transformateurs de faibles puissances, les sections sont carrées, on réalise des sections circulaires pour ceux de grosses puissances. Les sections circulaires offrent davantage de résistance aux efforts électrodynamiques entre spires en cas de court-circuit.

Erreur! Liaison incorrecte.

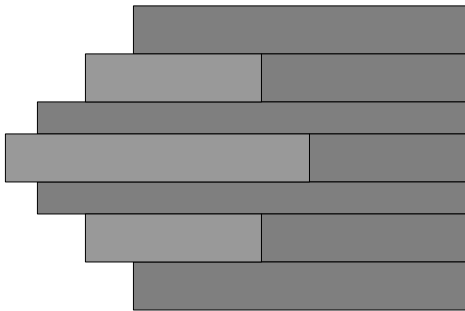
section carrée

section à gradins

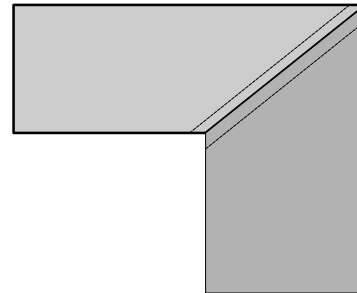
### 11.16.3 Assemblage des colonnes de type "cuirasse"

La réalisation de joints magnétiques permet de diminuer la réluctance minimale  $\mathfrak{R}$  du circuit magnétique. Ces joints peuvent être de 2 types:

joints enchevêtrés



joints à coupe oblique



### 11.16.4 Matériaux employés

Les matières utilisées sont:

tôles d'acier au silicium, pertes  $1[\text{Wkg}^{-1}]$  à l'induction magnétique  $B$  de  $1 [\text{T}]$

tôles à cristaux orientés, pertes  $0.55 [\text{Wkg}^{-1}]$  également à  $1 [\text{T}]$

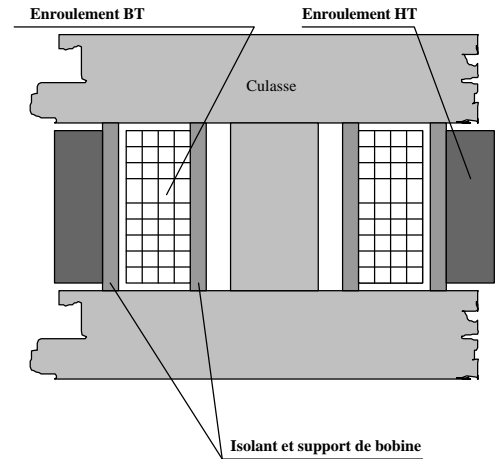
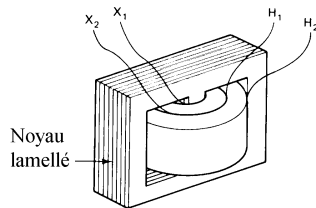
Ces tôles ont une épaisseur de  $0.35 [\text{mm}]$  et sont isolées sur une face par oxydation artificielle.

Le serrage des tôles est effectué par des tiges filetées régulièrement réparties et isolées du circuit magnétique.

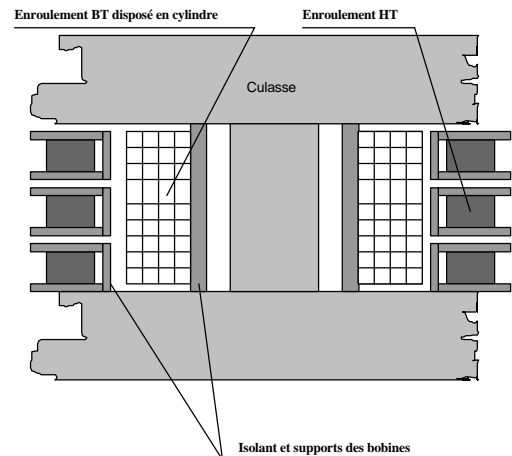
## 11.17 Circuit électrique du transformateur réel

Les bobinages des transformateurs peuvent être de différents types:

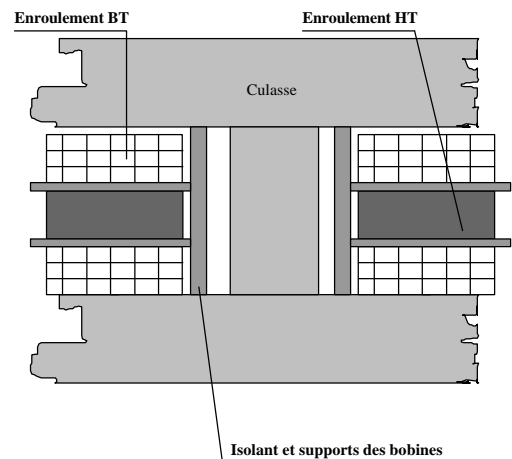
**Bobinage concentrique** (utilisé dans les petits transformateurs)



**Bobinage mixte** car il permet d'éviter les très fortes différences de potentiel entre les spires d'extrémité de 2 couches successives. On réalise des bobines plates qui sont montées en série les unes avec les autres (utilisation HT et THT)



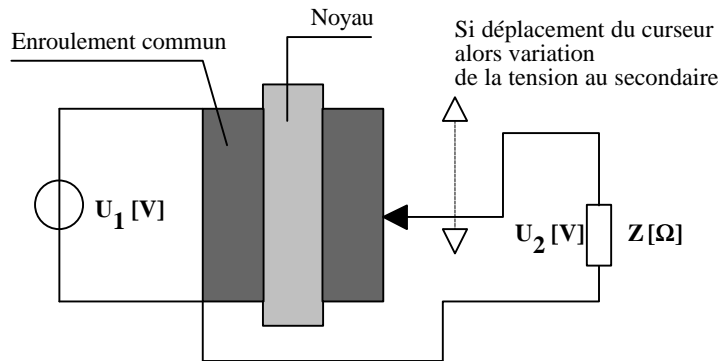
**Bobinage alterné en galettes**, car il offre l'avantage d'être plus facile à isoler du circuit magnétique (utilisation HT et BT)





## 11.18 Autotransformateur

Nous appelons *autotransformateur* un élément dont une partie de l'enroulement unique appartient simultanément au primaire et au secondaire.



Vue en coupe d'un autotransformateur variable montrant (1) noyau de fer toroidal; (2) enroulement; (3) balai mobile. (American Superior)

Le principe de fonctionnement est le même que le transformateur étudié précédemment. L'enroulement commun possède  $N$  spires au total et est alimenté par la tension  $U_1$ . Le curseur prend qu'une partie  $N'$  des spires.

### Exemple:

Un autotransformateur possède 6000 spires. La tension d'alimentation est de 400 [V]. Calculez la tension alimentant la charge, si nous plaçons la prise à la moitié du déplacement total.

Données:

$$N = 6000 \text{ spires}$$

$$U_1 = 400 \text{ [V]}$$

$$N' \Rightarrow 0.5 * N'$$

Inconnue:

$$U_2 = ?$$

Relation:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

Analyse

Dans notre cas, nous considérons que:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N}{N'}$$

$$U_2 = \frac{U_1 * N'}{N}$$

Application numérique:

$$U_2 = \frac{400 * (0.5 * 6000)}{6000} = 200 \text{ [V]}$$

### 11.18.1 Considérations pratiques de l'autotransformateur

L'avantage d'un autotransformateur est de présenter à poids égal une puissance plus grande qu'un transformateur classique, ceci par la mise en commun du primaire et du secondaire. (pertes cuivre plus petites)

L'inconvénient d'un autotransformateur est de ne présenter aucune séparation galvanique, donc moins de sécurité même sans défaut.

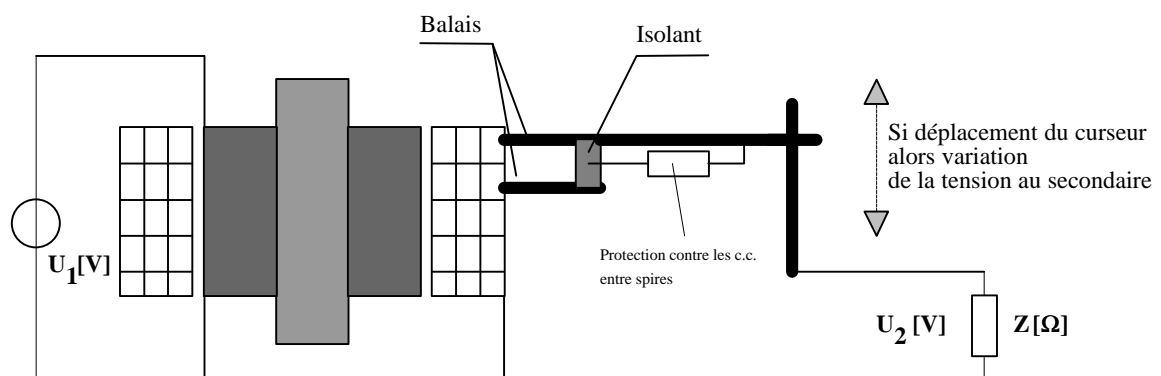
L'utilisation d'un autotransformateur est interdite pour l'alimentation de jouets d'enfants.

L'utilisation d'un autotransformateur peut se faire dans le sens d'abaisser la tension, mais aussi dans le sens d'élever la tension.

### 11.19 Transformateur de réglage

Il est parfois nécessaire de posséder la possibilité de faire varier un peu la tension secondaire  $U_2$  comme avec l'autotransformateur, mais de conserver la séparation galvanique comme un transformateur classique. Nous utiliserons le **transformateur de réglage**.

La commutation des spires doit se faire sans coupure lors du passage d'une spire à l'autre. (arc de self-induction). Nous y plaçons une résistance ou réactance pour éviter un arc électrique. Cette résistance ou réactance évite le court-circuit direct de la spire au moment où les balais touchent 2 plots sous tension à la fois.



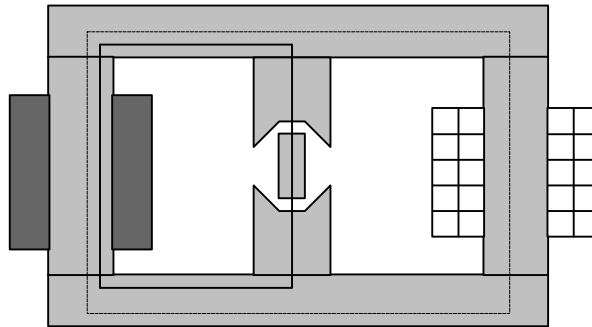
## 11.20 Transformateur à fuites magnétiques

Le transformateur à fuites magnétiques permet de court-circuiter le secondaire pendant le fonctionnement, sans danger pour le transformateur et sans répercussion sur le réseau d'alimentation. Quelques utilisations des transformateur à fuites magnétiques :

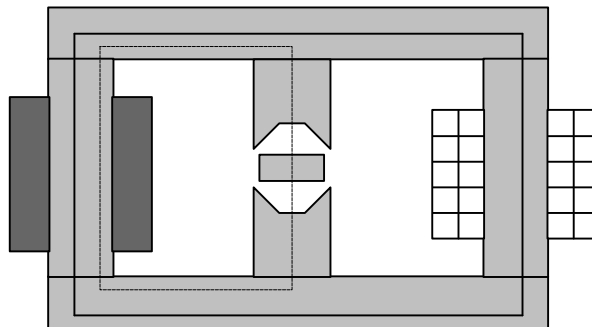
- poste de soudure électrique à arc.
- allumage des brûleurs à mazout.
- allumage de certaines lampes à décharge.
- alimentation de circuits de sonneries.
- alimentation de grands four à arc.

Dans un transformateur usuel, nous cherchons à avoir un flux magnétique de dispersion  $\Phi$  le plus petit possible. Au contraire, dans un transformateur à fuites magnétiques, nous nous arrangeons pour qu'une partie du flux  $\Phi$  ne passe pas par l'enroulement secondaire. Par ce système on obtient des impédances très élevées.

Avec maximum de lignes de forces dans le shunt magnétique



Avec un maximum de lignes de forces dans l'enroulement secondai

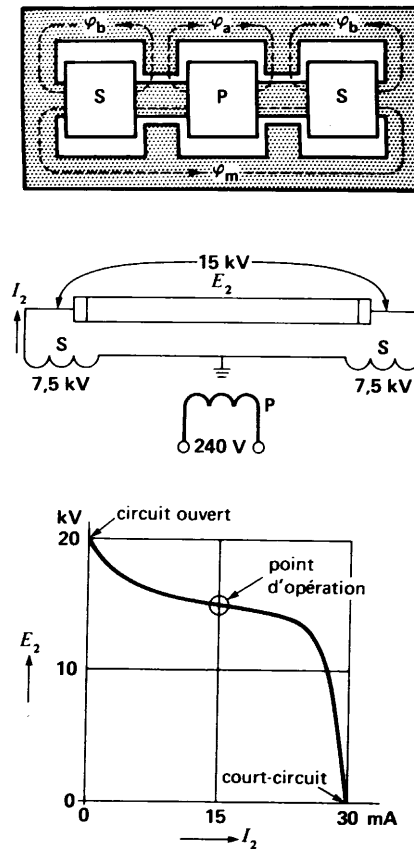


### 11.20.1 Fonctionnement:

Une partie du flux  $\Phi$ , que nous pouvons régler en modifiant la position du **shunt magnétique** (noyau mobile) ne passe plus à travers l'enroulement secondaire. La tension induite  $U_{i2}$  varie proportionnellement en fonction de la réluctance  $\mathfrak{R}$ .

Lors d'une augmentation du courant secondaire  $I_2$ , le flux total diminue dans l'enroulement secondaire et par conséquent il y a une baisse de la tension au secondaire  $U_2$ . D'autre part le flux total ne passera pas dans l'enroulement primaire, mais passera par le shunt magnétique.

### 11.20.2 Exemple d'application (Enseigne lumineuse)



La figure ci-dessus montre la construction d'un transformateur pour enseigne lumineuse.

Les arcs électriques et les décharges dans les gaz possèdent une caractéristique  $U=f(I)$  de pente négative, c'est-à-dire que la tension diminue à mesure que le courant augmente. Pour maintenir un courant constant et un arc stable, on est obligé d'ajouter une impédance en série avec ce genre de charge. Il est souvent plus simple de les alimenter avec un transformateur haute impédance. Les transformateurs qui alimentent les lampes à vapeur de mercure ou les lampes à halogénures métalliques, sont des transformateurs à fuites magnétiques.

Le primaire, alimenté par 240 [V], induit une tension de 7500 [V] dans chacun des enroulements secondaires S raccordés en série. A cause du flux de fuite considérable, la tension secondaire diminue rapidement avec le courant de charge. Lorsque l'arc est amorcé, le secondaire est en court-circuit et le courant ne dépasse pas 30 [mA]. Ces transformateurs possèdent des puissances apparentes comprises entre 50 [VA] et 1500 [VA] et la tension secondaire est disponible entre 2 [kV] et 20 [kV].

### 11.20.3 Exemple d'application (Soudure à l'arc)

Les transformateurs utilisés pour la soudure à l'arc possèdent aussi une grande réactance de fuite afin de stabiliser l'arc durant la soudure. La tension à circuit ouvert est de l'ordre de 70 [V], ce qui favorise l'initiation de l'arc lorsque l'électrode touche la pièce à souder. Dès que l'arc s'établit, la tension baisse à environ 15 [V], dépendant de la longueur de l'arc et de l'intensité du courant.

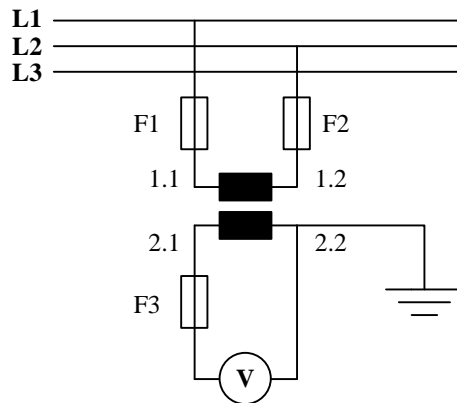
### 11.21 Transformateur de tension TP (potentiel)

Dans une installation électrique, il est nécessaire de pouvoir **mesurer** des hautes tensions. Il est évident qu'il faut abaisser cette tension au moyen d'un transformateur.

Les installations de mesures nécessitent des éléments de grande précision.

Dans la pratique, les transformateurs de tension TP ont un enroulement  $N_1$  plus grand que  $N_2$ . La tension secondaire  $U_2$  est généralement de 100 [V].

Le transformateur de tension TP se branche en dérivation sur le circuit à mesurer.



Le principe de fonctionnement est celui du transformateur normal.

La plaquette signalétique peut être la suivante:

Typ SNAN	1993
Classe 0.5	10 kV 100 V
100 VA	3 A
50 Hz	

Les transformateurs de tension possèdent les indications de classe de précision comme pour les appareils de mesures. (voir chapitre 11)

**Ne jamais court-circuiter un TP**

**Exemple:**

Un transformateur possède la plaquette ci-dessus.

Donnez la tension primaire, si nous connectons un voltmètre au secondaire du TP et que celui-ci indique 76 [V].

Données:

transfo TP  $U_1$  10000 [V]  $U_2$  100 [V]

$U_{\text{voltmètre}} = 76$  [V]

Inconnue:

$U_1 = ?$

Relation:

$$\text{facteur de lecture} = \frac{U_{1\text{TP}}}{U_{2\text{TP}}}$$

Analyse:

$$U_{1\text{TP}} = U_{2\text{TP}} * \text{facteur de lecture}$$

Application numérique:

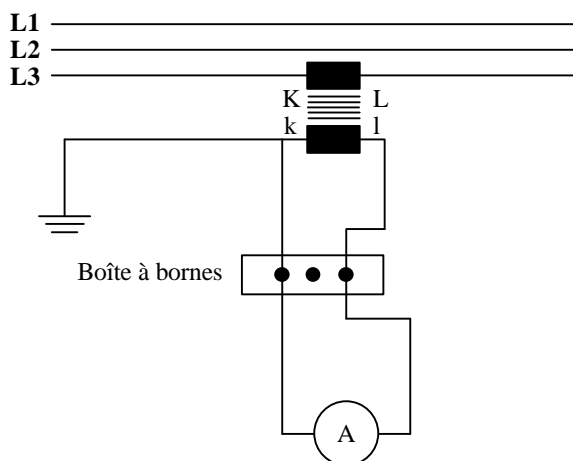
$$U_{1\text{TP}} = 76 * \frac{10000}{100} = 7600 \text{ [V]}$$

## 11.22 Transformateur de courant TI

Dans la technique de mesure, il est nécessaire de diminuer les dimensions des conducteurs pour raccorder les compteurs d'énergie ou autres.

Si la valeur du courant primaire est grande, nous diminuons le courant secondaire en augmentant la tension secondaire. L'enroulement primaire possède peu de spires. L'enroulement secondaire possède beaucoup de spires.

Le transformateur de courant TI se place en série dans le circuit à mesurer.



La boîte à bornes doit être facilement accessible, car c'est elle qui permet de ponter le secondaire du TI, si l'instrument de mesure devait être enlevé.

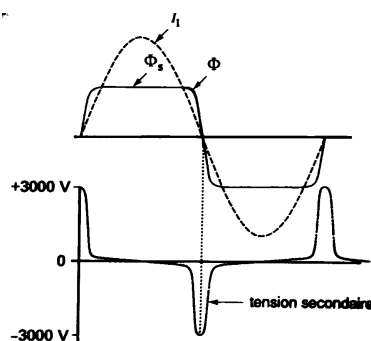
### 11.22.1 Fonctionnement du TI

Au secondaire d'un transformateur de courant TI, les ampèremètres, compteurs d'énergie, relais ou autres doivent être parcourus par le même courant choisis de façon générale à 5 ou 10 [A] pour le courant nominal. L'impédance de ces appareils est petite, nous avons le secondaire pratiquement en court-circuit. Contrairement au transformateur usuel, ce n'est pas le courant secondaire  $I_2$  qui détermine le courant primaire  $I_1$ . C'est l'inverse du transformateur usuel.

Le transformateur de courant TI doit être résistant aux court-circuits (noyaux saturés).

Vous avez remarqué que dans la pratique le secondaire d'un transformateur de courant TI ne possède pas de fusible. Pourquoi ?

### 11.22.2 Danger si le secondaire d'un transformateur de courant est ouvert



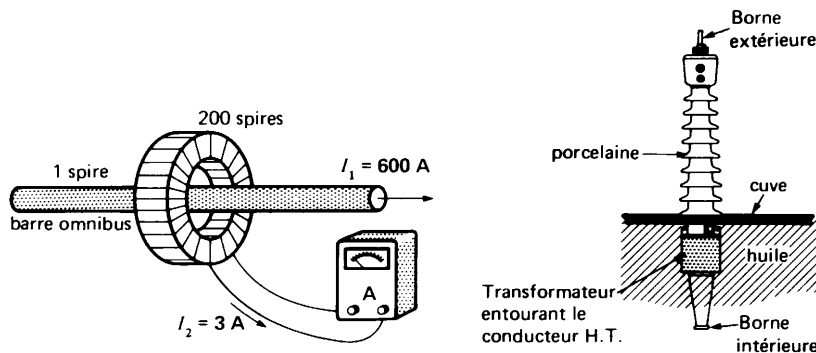
On ne doit **jamais** ouvrir le secondaire d'un transformateur de courant lorsque le primaire est alimenté. S'il est nécessaire de retirer un instrument raccordé au secondaire, il faut auparavant mettre le secondaire en court-circuit et *ensuite* retirer l'instrument.

Si par mégarde, on ouvre le circuit secondaire, le courant dans le primaire continue à circuler inchangé, celui-ci est déterminé par la charge du réseau. Le courant de ligne devient alors le courant d'excitation du transformateur. Comme celui-ci est 100 à 200 fois plus grand que normal, il se produit une densité de flux très élevée qui sature le noyau.

En se référant à la figure ci-dessus, lorsque le courant primaire  $I_1$  croît et décroît durant le premier demi-cycle, le flux croît et décroît également, mais il demeure au niveau de saturation  $\Phi_s$  pour la plupart du demi-cycle. Le même phénomène se produit pour le cycle négatif qui suit. Lors de ces périodes de saturation, la tension induite est très faible, car le flux change très peu. Cependant, durant les périodes non saturées, le flux change très vite, ce qui peut induire bornes du secondaire une tension crête de quelques milliers de volts, assez haute pour provoquer un choc dangereux. La tension est d'autant plus élevée que la puissance apparente du transformateur est grande.

$$S_1 = S_2 \quad U_1 \neq 0[V] \text{ et } I_1 \neq 0[A] \quad \Rightarrow \quad S_1 \neq 0[VA] \quad I_2 = 0[A] \quad \Rightarrow \quad U_2 = \infty [V]$$

### 11.22.3 Différentes formes de TI



$S_1 = S_2$  si transformateur idéal. Ce qui implique  $U_1 I_1 = U_2 I_2$   
 dans le cas du transformateur de courant TI prenons un exemple  
 en fonctionnement nominal

$$5 \cdot 100 = 100 \cdot 5$$

en fonctionnement avec circuit secondaire ouvert

$$5 \cdot 100 \Rightarrow U_{\text{défaut}} \cdot 0$$

La plaquette signalétique d'un transformateur de courant peut être la suivante;

Typ SNAN	1993
Classe 0.2	10 kV
30 VA	300 A
50 Hz	5 A

### 11.22.4 Pince ampèremétrique

La pince ampèremétrique est une autre forme de transformateur de courant TI. c'est une variante du transformateur de courant TI. Le primaire de la pince est constitué par une seule spire. Le circuit s'ouvre en son milieu est permet d'y placer le conducteur à mesurer. La lecture se fait directement sur un ampèremètre disposé sur la pince.

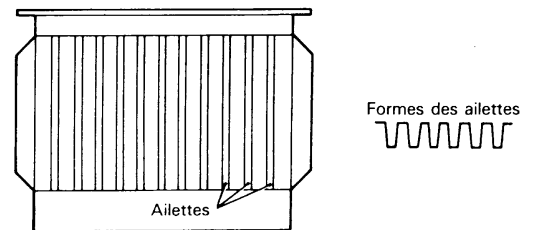


## 11.23 Refroidissement des transformateurs

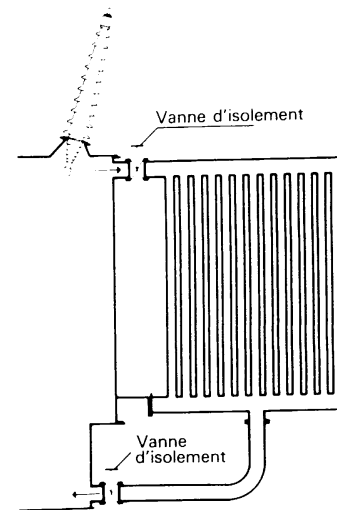
Il est nécessaire de refroidir les transformateurs de grosses puissances afin d'éviter la détérioration des vernis isolants (courant de Foucault).

Ce refroidissement peut se faire de différentes façons:

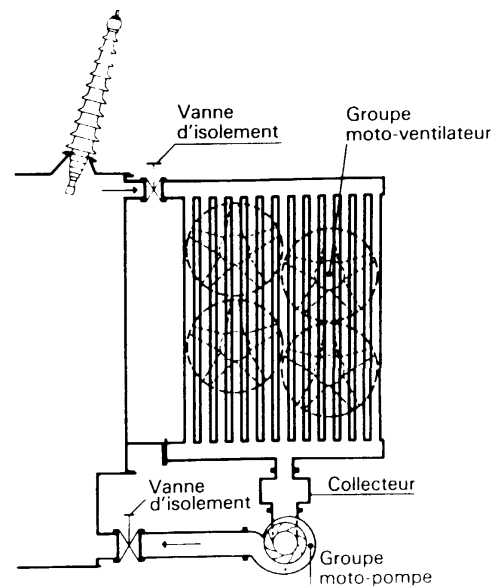
**Refroidissement dans l'air** le transformateur est mis dans une enceinte grillagée, la ventilation peut être naturelle ou forcée (ventilateur)



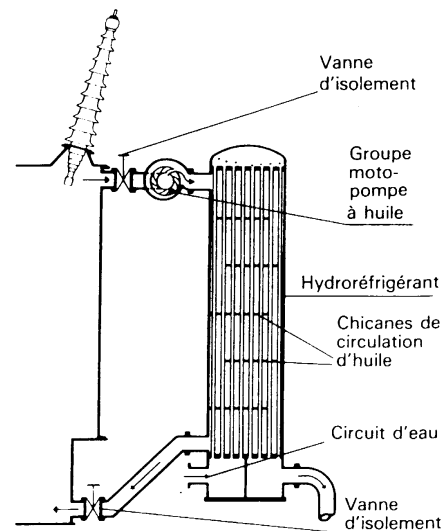
**Refroidissement naturel dans l'huile** une cuve renferme le transformateur. Cette cuve est munie d'ailettes. L'huile se refroidit au contact des parois (échange thermique)



**refroidissement par radiateur d'huile**  
l'huile circule naturellement dans un radiateur séparé de la cuve. Ce radiateur peut être ventilé et la circulation d'huile forcée par une



**Refroidissement avec hydroréfrigérant** la circulation de l'huile s'effectue dans une cuve contenant des tubes à l'intérieur desquels circule de l'eau froide.



### 11.23.1 Diélectrique

Le diélectrique assure le refroidissement et l'isolement des transformateurs. Selon les tensions appliquées aux enroulements, l'isolement peut être assuré par:

**l'air**, c'est le cas des petits transformateurs en BT **l'huile minérale**, très employée dans tous les transformateurs de puissance, mais elle présente des risques d'incendies et d'explosion **de quartz**, c'est un sable qui étouffe les flammes mais rend le refroidissement plus difficile.

### 11.23.2 Symboles pour le diélectrique et le refroidissement

1ère lettre	2ème lettre	3ème lettre	4ème lettre
Nature du diélectrique	mode de circulation diélectrique	fluide du refroidissement	mode de circulation fluide
O huile minérale	N naturel	O symbole comme 1ère lettre	N symbole comme 2ème lettre
L diélectrique chloré	F forcée	L	F
G gaz	D forcée et dirigée dans les enroulements	G	D
A air		A	
S isolant solide		S	

**Exemple:**

ONAN signifie transformateur immergé dans l'huile, à circulation naturelle, refroidi par air, à ventilation naturelle.

**11.24 Protection**

Tous les transformateurs doivent être protégés contre

- les surintensités
- les surtensions
- les surchauffes

Les normes CEI et ASE fixent les valeurs et les temps pendant lequel l'élément doit supporter ces phénomènes sans risque de détérioration.

**11.24.1 Surintensité**

Pour les petits transformateurs, la protection contre les surintensités est assurée par des déclencheurs électromagnétiques et thermiques ou par des fusibles placés en aval ou en amont ou mieux encore des 2 côtés.

Le calcul du courant de court-circuit maximum d'un transformateur s'effectue à partir de l'essai en court-circuit (*voir 11.15.2*).

**11.24.2 Surtension**

Au court de l'essai en court-circuit, nous mesurons la tension primaire  $U_{1cc}$  qui fait débiter son courant nominal au secondaire court-circuité.  $U_{1cc}$  est naturellement bien inférieure à la tension primaire nominale  $U_1$ .

La relation est la suivante:

$$\varepsilon = \frac{U_{1cc}}{U_1} [-]$$

Le rapport  $\varepsilon$  (epsilon) est appelé "tension de court-circuit". Ce rapport est une caractéristique importante du transformateur. Il permet l'évaluation rapide du courant de court-circuit et joue un rôle important dans l'étude et le fonctionnement des transformateurs en marche parallèle.

**11.24.3 Protection contre les surtensions**

En pratique, la protection contre les surtensions peut être réalisée de la façon suivante:

- parafoudre
- câble mis à la terre
- renforcement de l'isolation des bobines etc

#### 11.24.4 Surchauffe

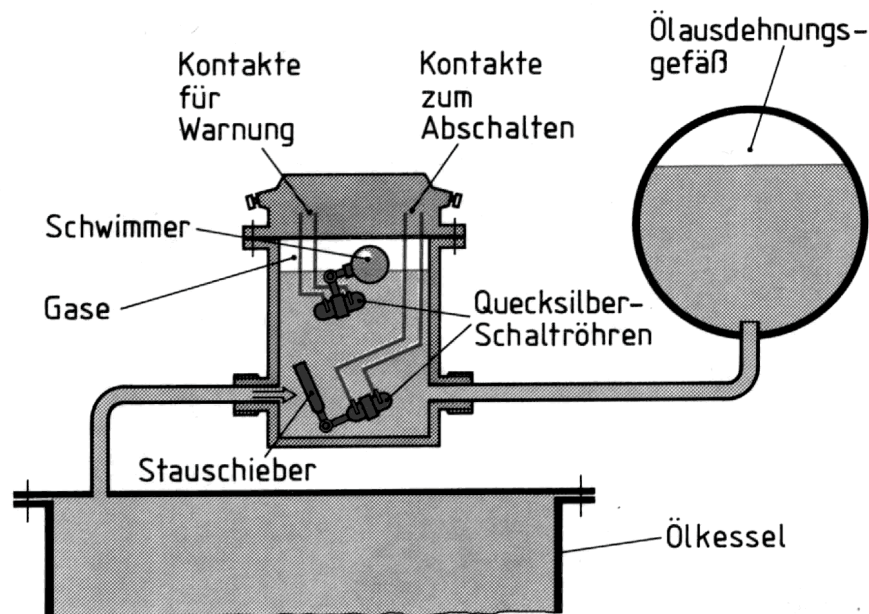
La surchauffe d'un transformateur de petite puissance à air peut être contrôlée par une résistance à coefficient de température négatif NTC ou positif PTC montée en série dans un circuit de commande.

La surchauffe d'un transformateur à huile provoque la dilatation du liquide de refroidissement, le déplacement de ce liquide ou son échauffement.

Un dispositif de surveillance est installé sur le transformateur et porte le nom de *relais Buchholz*.

Le réservoir d'expansion est mis en contact avec l'air par l'intermédiaire d'un assécheur d'huile (Silicagel). Il compense tous les changements de volume d'huile et d'oxydation de l'huile (diminution des caractéristiques isolantes de l'huile). Un thermomètre à contact et un contrôleur de niveau complètent l'équipement.

En cas de défaut à l'intérieur du transformateur, le relais Buchholz détecte le dégagement gazeux. Deux niveaux de surveillance sont en service. Premier stade, le relais Buchholz signale la présence d'un défaut. Deuxième stade, Le relais Buchholz coupe l'alimentation du transformateur.



## **11.25 TRANSFORMATEURS TRIPHASES**

### **11.25.1 Description des transformateurs triphasés.**

#### **11.25.1.1 Ensemble de 3 transformateurs monophasés identiques**

On connecte un transformateur monophasé sur chacune des phases. Cette solution est parfois utilisée en THT (Très Haute Tension) dans le domaine des puissances élevées.

#### **11.25.1.2 Transformateur triphasé**

Le plus souvent on utilise un appareil unique dont la carcasse magnétique comporte :

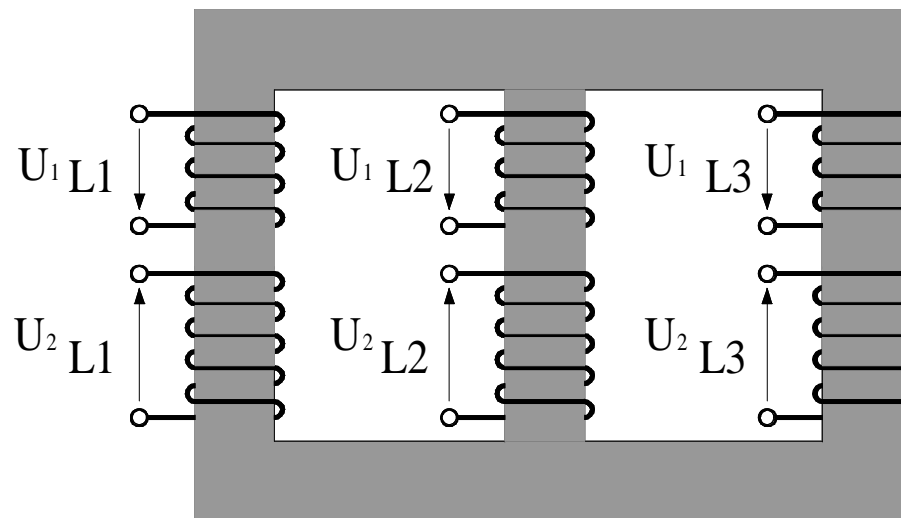
3 noyaux (ou colonnes) réunis par 2 culasses.

### 11.25.2 Fonctionnement à vide en régime équilibré

Soit un transformateur triphasé dont les enroulements présentent

- par phase,  $N_1$  spires au primaire et  $N_2$  spires au secondaire
- des couplages quelconques (étoile ou triangle)

Appliquons respectivement aux bornes des phases du primaire les tensions sinusoïdales équilibrées  $U_{1L1}$  [V];  $U_{1L2}$  [V];  $U_{1L3}$  [V]



Les flux magnétiques induisent dans les trois phases du secondaire des tensions sinusoïdales équilibrées, de sens opposé à celles du primaire.

### 11.25.3 Fonctionnement en charge

On raccorde les 3 phases du secondaire sur 3 récepteurs identiques de facteur de puissance  $\cos \varphi_2$  [-]

Soit  $I_{1L1}$  [A] ;  $I_{1L2}$  [A] ;  $I_{1L3}$  [A] les courants dans les 3 phases du primaire.

Soit  $I_{2L1}$  [A] ;  $I_{2L2}$  [A] ;  $I_{2L3}$  [A] les courants dans les 3 phases du secondaire.

La première colonne fonctionne comme un transformateur monophasé parfait de rapport

$$m = \frac{U_{2L1}}{U_{1L1}} [-]$$

Il en est de même pour les 2 autres colonnes, soit pour résumer :

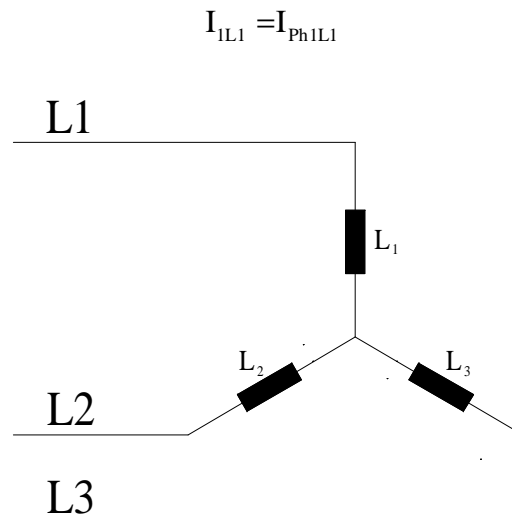
$$m = \frac{U_{2L1}}{U_{1L1}} = \frac{U_{2L2}}{U_{1L2}} = \frac{U_{2L3}}{U_{1L3}}$$

En régime équilibré toute la théorie du transformateur monophasé est applicable à condition de raisonner « phase par phase », c'est-à-dire « à une phase du primaire correspond une phase du secondaire ».

## 11.25.4 Couplages du primaire et du secondaire

### 11.25.4.1 Couplage étoile

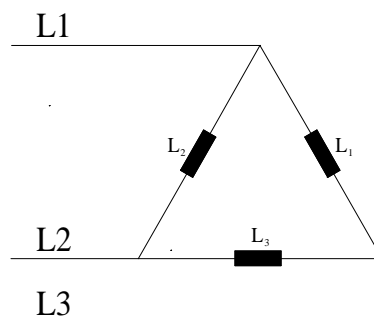
Les courants qui circulent dans les fils de la ligne sont les mêmes que les courants qui circulent dans les phases du transformateur.



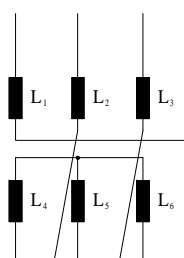
### 11.25.4.2 Couplage triangle

La tension sur les enroulements est la même qu'entre les phases  $L_1 ; L_2 ; L_3$  ;

$$U_{L1L2} = U_{Ph1L1}$$



### 11.25.4.3 Couplage zig-zag



On verra plus loin l'utilisation d'un tel couplage du secondaire.

### 11.25.5 Fonctionnement en régime déséquilibré.

Le cas le plus fréquent du fonctionnement d'un transformateur triphasé en régime déséquilibré est celui des réseaux de distribution électrique. Il est nécessaire de savoir choisir le couplage des enroulements primaires et secondaires. Pour savoir quel couplage il convient d'adopter au primaire et au secondaire, il faut considérer un transformateur triphasé dont :

- Le primaire est alimenté par une ligne à 3 fils (les tensions sont équilibrées)
- Le secondaire a son neutre sorti.

Ce transformateur est soumis aux conditions limites suivantes :

- La phase du secondaire bobinée sur la 1<sup>ère</sup> colonne est chargée.
- Les 2 autres phases du secondaire sont à vide.

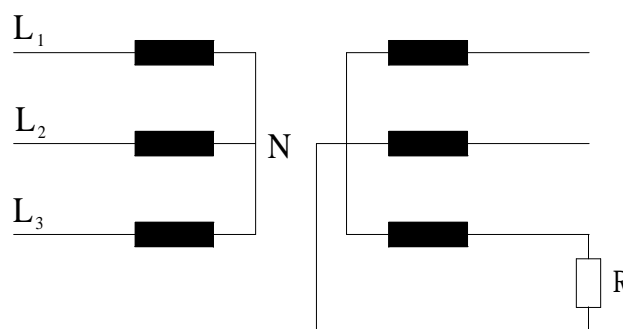
#### 11.25.5.1 Fonctionnement des couplages TRIANGLE-ETOILE et ETOILE-ETOILE

Le couplage étoile du secondaire permet de sortir le neutre et de le connecter au fil neutre du réseau de distribution.

Le couplage TRIANGLE-ETOILE convient bien, car le courant qui passe dans la charge ne circule pas dans les autres phases non chargées, on garantit ainsi l'absence de perturbations. C'est un couplage utilisable lorsqu'il y a risque de déséquilibre.

Le couplage ETOILE-ETOILE ne convient pas, car le courant qui passe dans la charge, crée un courant  $I_{ph1}$  qui s'en retourne forcément par les 2 autres phases du primaire ; or au secondaire les phases correspondantes ne sont parcourues par aucun courant : on n'a plus, sur chaque colonne, équilibre entre la tension induite au primaire et celle du secondaire. Le fonctionnement ne peut être satisfaisant.

Le courant  $I_{ph2}$  induit dans la première phase du secondaire, obéit à la loi de Lenz : la bobine réagit de façon à réduire ce courant, c'est-à-dire à diminuer la tension  $U_{ph2}$  et par suite, au primaire, la tension  $U_{ph1} - U_N$



Les tensions induites dans les phases



### 11.25.5.2 Fonctionnement des couplages ETOILE-ZIG-ZAG

Pour conserver au primaire l'avantage du couplage Y on a imaginé au secondaire un couplage dit en zig-zag qui :

permet de sortir un fil neutre,

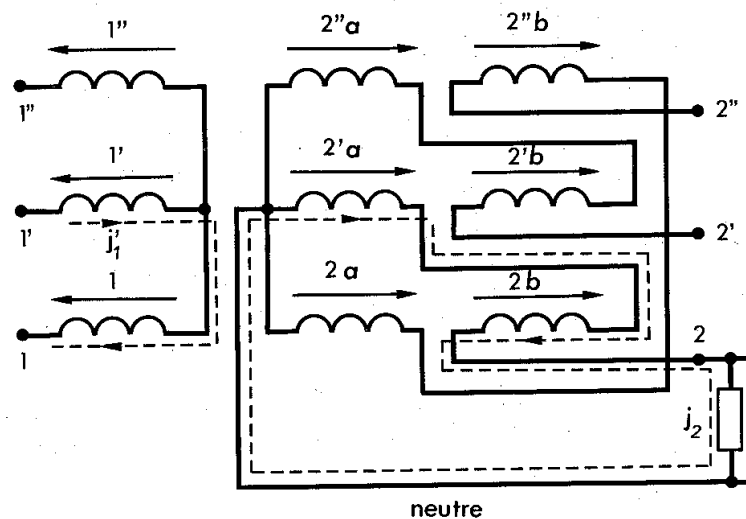
présente un fonctionnement satisfaisant en régime déséquilibré.

#### Réalisation

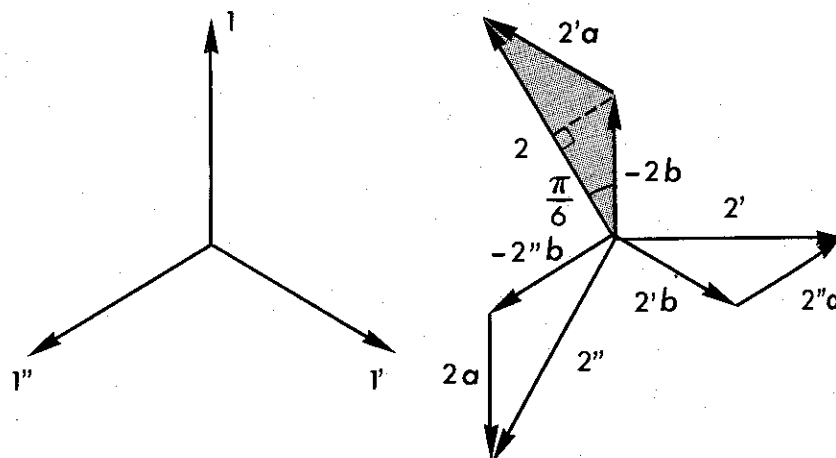
Sur chaque colonne on a disposé une phase du primaire ( $N_1$  spires) et 2 bobines identiques ( $N_2$  spires chacune) ; chaque phase du secondaire est obtenue en mettant en série deux de ces bobines,

prises en sens inverse,

situées sur deux colonnes différentes.



Représentation vectorielle des tensions (voir ci-dessus), l'allure de ce dessin justifie le terme de zigzag.



## 11.25.6 Couplage et indice horaire

### 11.25.6.1 Modes de couplage

On appelle couplage d'un transformateur triphasé, l'association de deux types déterminés de branchement, au primaire et au secondaire.

Au primaire (haute tension), on n'utilise que le montage étoile ou le montage triangle. La notation du type de branchement est en lettres majuscules, soit **Y** pour étoile et **D** pour triangle.

Au secondaire (basse tension), les trois montages sont possibles. La notation du type de branchement est en lettres minuscules, soit *y* pour étoile, *d* pour triangle et *z* pour zig-zag.

Les couplages existants sont :

		Primaire	Secondaire
<b>Y</b>	<i>y</i>	Etoile	Etoile
<b>Y</b>	<i>z</i>	Etoile	Zig-Zag
<b>Y</b>	<i>d</i>	Etoile	Triangle
<b>D</b>	<i>y</i>	Triangle	Etoile
<b>D</b>	<i>z</i>	Triangle	Zig-Zag

On a par exemple le groupe de couplage **Dy 11**

### 11.25.6.2 Indice horaire

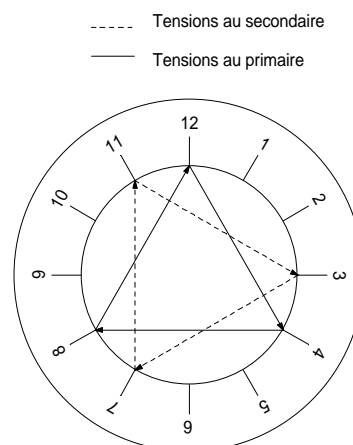
Le nombre (de 0 à 11) est appelé nombre horaire. Il caractérise le déphasage relatif entre les tensions de ligne primaire et secondaire (à vide). Cet angle correspond pour  $360^\circ$ , aux 12 heures du cadran d'une horloge repérées de 0 à 11, chaque angle horaire étant un multiple de  $30^\circ$ .

Si l'on appelle,  $U_1L_1; U_1L_2; U_1L_3$ ; les bornes des phases primaires et  $U_2L_1; U_2L_2; U_2L_3$ ; celles des secondaires, les tensions de lignes sont :

au primaire :  $U_1L_1; U_1L_2; U_1L_3$ ;

au secondaire :  $U_2L_1; U_2L_2; U_2L_3$ ;

Le nombre horaire est indiqué par « l'heure » de la borne  $U_2L_2$  lorsque  $U_1L_2$  est placée sur 0.

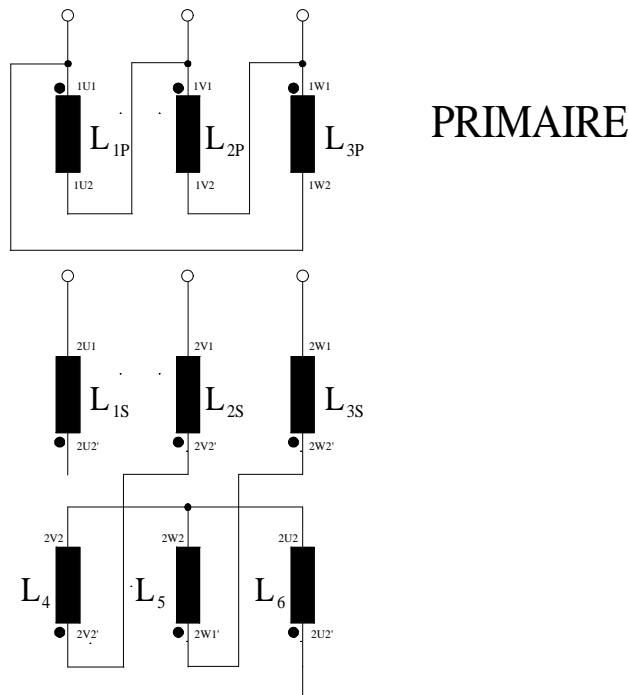


Dans l'exemple ci-dessus, le nombre horaire est 11.

Dans ce qui suit, on montrera à l'aide d'un exemple comment déterminer le nombre horaire.

### 11.25.6.3 Exemple de détermination du nombre horaire.

On commence par dessiner les enroulements et leur couplage. On représente les phases secondaires exactement au-dessous des phases primaires. On représente par un point les bobines homologues.



**Figure 11.25-1 Tensions d'un couplage étoile-zig-zag**

D'après la position des points, on voit par exemple que la tension  $U_{L1S}$  à vide est en opposition de phase par rapport à  $U_{L1P}$  alors que  $U_{L6}$  est en phase avec  $U_{L3P}$ .

On représente le triangle des tensions de ligne primaires de manière que la borne 2V1 soit sur 0.

Dans le même diagramme, on représente les tensions de phase du primaire. (dans notre exemple, elles sont égales aux tensions de ligne, puisque le primaire est couplé en triangle).

On représente ensuite les tensions de phase secondaires en tenant compte des points de polarité (déphasées de  $180^0$  par rapport aux tensions de phase primaires)

Une fois les tensions de phases secondaires obtenues, on les dessine vectoriellement pour trouver les tensions de ligne.

On regroupe ces 3 tensions de telle sorte qu'elles forment un triangle.

Le groupe du transfo étudié est donc Dz6

11.25.6.4 Exemples d'utilisations de l'indice horaire.

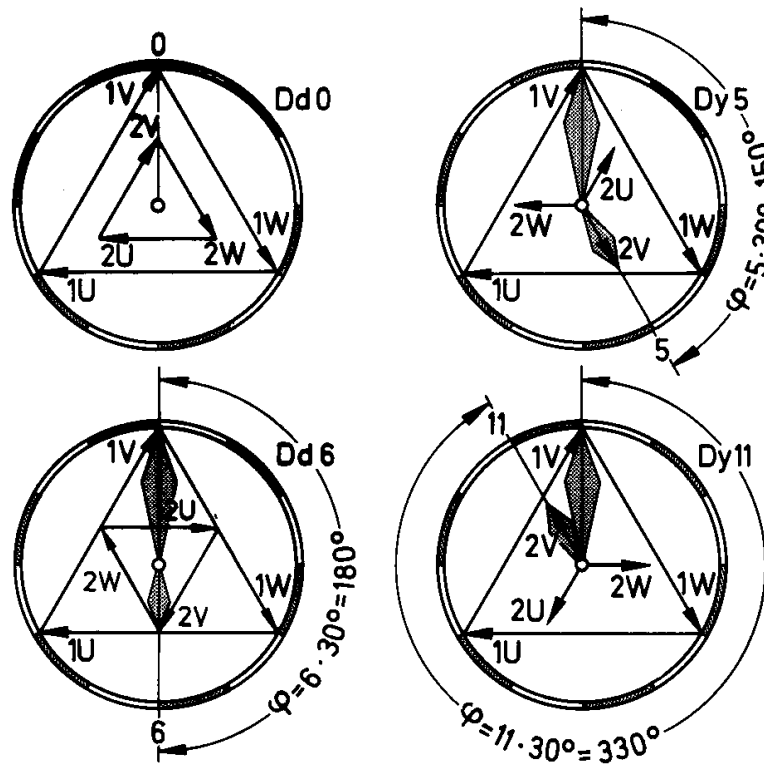


Figure 11.25-2 Dd0 ;Dy5 ;Dd6 ;Dy11

Exemple pour groupe de couplage Dy 5

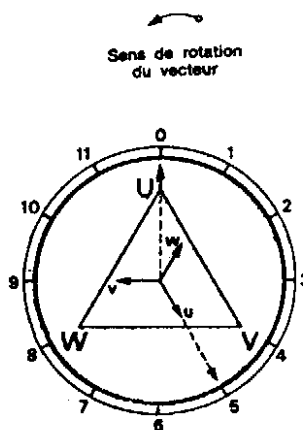
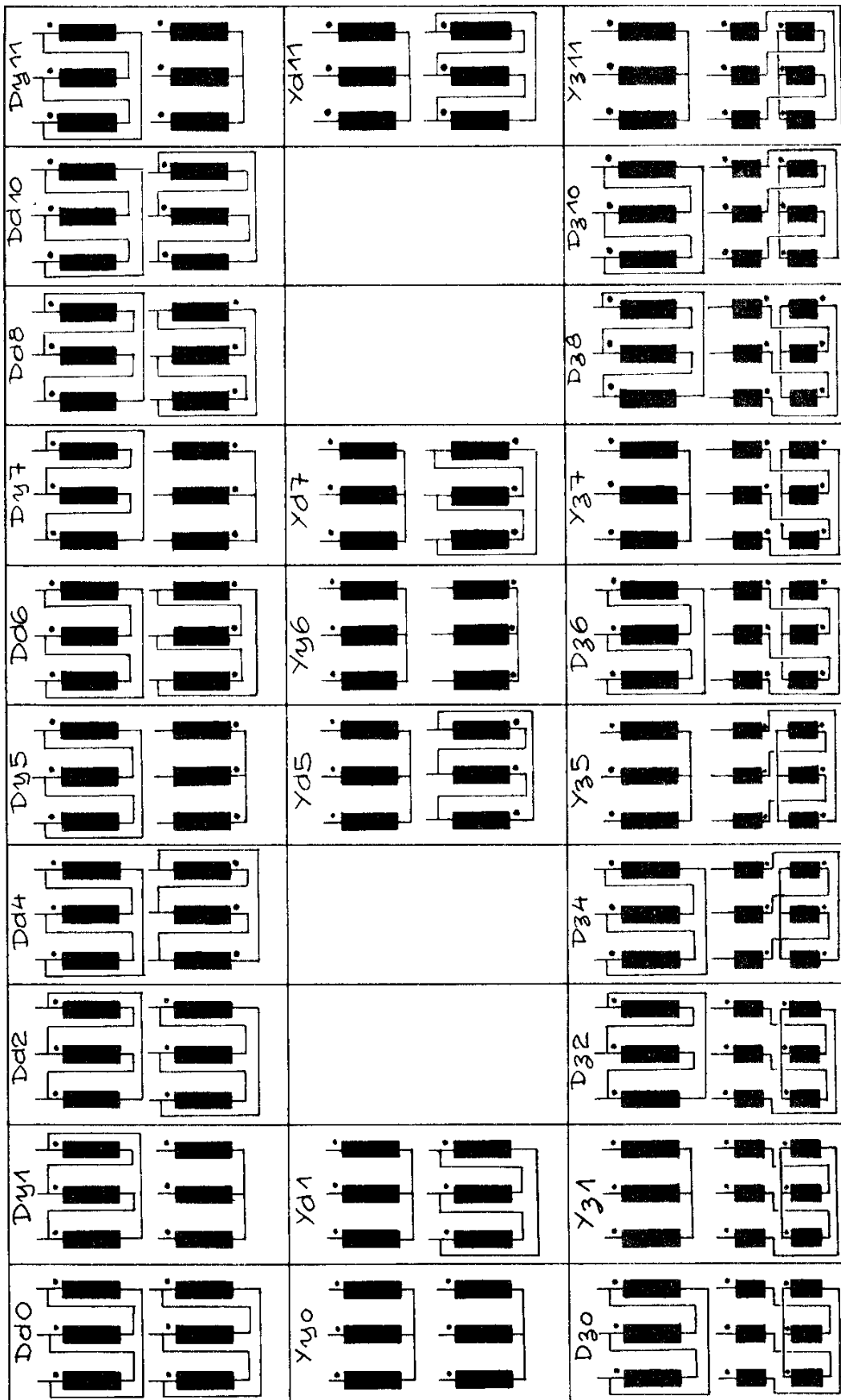


Figure 11.25-3 Autre exemple Dy5

11.25.6.5 Résumé des couplages possibles



## 11.26 Questions et problèmes

- 1) Quelles sont les parties essentielles d'un transformateur ?
- 2) A quoi les pertes dans un transformateur sont-elles dues ?
- 3) Donnez une expression mathématique de ces pertes.
- 4) Expliquez le terme "séparation galvanique".
- 5) Citez 5 utilisations courantes du transformateur.
- 6) Décrivez en détail le circuit ferromagnétique d'un transformateur. (construction, matières,...)
- 7) Quelles sont les caractéristiques d'un transformateur idéal ?
- 8) Sur un transformateur on doit brancher le générateur sur la bobine.....?
- 9) Sur un transformateur on doit brancher le récepteur (charge) sur la bobine.....?
- 10) Dans un transformateur; pourquoi le courant secondaire débité dans une charge produit une chute de tension aux bornes de la bobine secondaire ?
- 11) Qu'exprime le rapport de transformation ? Donnez le symbole de la grandeur et de l'unité.
- 12) Que définit la puissance apparente  $S$  [VA] ?
- 13) Dessinez le triangle des "PUISSANCES".
- 14) Pour un transformateur, à quel cas peut-on appliquer l'égalité suivante :  $S_1 = S_2$  ?
- 15) Pourquoi la puissance d'un transformateur ne s'exprime pas en Watts ?
- 16) Démontrez que le rapport des courants du primaire et du secondaire est inverse à celui des tensions
- 17) Définissez le terme valeur nominale (selon les NIBT)
- 18) Décrivez toutes les pertes d'un transformateur réel.
- 19) Justifiez la présence du courant magnétisant  $I_0$ .
- 20) Quand le transformateur est chargé, quelle genre de tension doit-on raccorder à la bobine primaire ?
- 21) Dans quel sens circule le flux magnétique induit par le courant  $I_2$  du secondaire pour un transformateur chargé ?

- 22) Pourquoi, la puissance demandée par la charge se reporte au primaire ?
- 23) Dans un transformateur où apparaissent les pertes fer ?
- 24) Dans un transformateur où apparaissent les pertes cuivre ?
- 25) Comment déterminer les pertes fer d'un transformateur ?
- 26) Comment déterminer les pertes cuivres d'un transformateur ?
- 27) Comment exprimer le rendement pour transformateur réel ?
- 28) Est-il avantageux de prendre un gros transformateur pour une petite charge ? (Justifiez)
- 29) Quelles sont les différentes formes des circuits magnétiques ?
- 30) Comment faire pour diminuer la réluctance  $\mathbb{R} \left[ \frac{A}{Wb} \right]$  des joints magnétiques ?
- 31) Quelles sont les matières utilisées pour les tôles magnétiques des transformateurs ?
- 32) Expliquez les différents types de refroidissements pour les transformateurs.
- 33) Qu'est-ce qu'un diélectrique ?
- 34) Pour un transformateur quels sont les diélectriques utilisés ?
- 35) Pour le diélectrique et le refroidissement d'un transformateur, donnez la signification de l'abréviation suivante : GNOD
- 36) Citez les différents types de circuits électriques pour des transformateurs réels.
- 37) Quelles sont les protections essentielles pour des transformateurs ?
- 38) Comment les petits transformateurs sont-ils protégés contre les surintensités ?
- 39) Comment protéger les transformateurs contre les surtensions ?
- 40) Dans les transformateurs de grande puissance, comment se nomme le dispositif de surveillance installé sur le transformateur ?
- 41) Dans le réservoir d'expansion d'huile, se trouve un dispositif d'assèchement d'air. Pour quelles raisons ?
- 42) Décrivez (dessin) un autotransformateur.
- 43) Quel est l'avantage d'un autotransformateur ?
- 44) Quel est l'inconvénient d'un autotransformateur ?

- 45) Quelle est la différence entre un autotransformateur et un transformateur de réglage ?
- 46) Quand le curseur de réglage de la tension  $U_2$  passe d'une spire à l'autre, il y a un instant de coupure, que se passe-t-il ? Comment éviter ce désagrément ?
- 47) Quel est le principe d'un transformateur à fuites magnétiques ?
- 48) Citez des utilisations du transformateur à fuites magnétiques.
- 49) Expliquez la relation entre la position du shunt magnétique et la valeur du flux magnétique.
- 50) Quel appareil utilise-t-on pour les mesures de haute tension ?
- 51) Que signifie l'abréviation TP ?
- 52) Que doit-on brancher au secondaire d'un transformateur de tension ?
- 53) Comment brancher un transformateur de courant ?
- 54) Si le secondaire d'un TI s'ouvre, que va-t-il se passer ?
- 55) Quelles sont les diverses formes des TI ?



**11.26.2 PROBLEMES**

1) Un transformateur de tension (2400 V / 240 V) possède une puissance de 100 kVA et 60 spires pour la bobine secondaire.

Calculer :

La valeur du courant primaire et secondaire.

Le nombre de spires de la bobine primaire.

2) Une ligne de distribution alimente sous une tension de 6900 V un transformateur dont le primaire comporte 1500 spires et le secondaire 24 spires.

Calculer :

La tension du secondaire.

Les courants primaire et secondaire si une charge de  $5 \Omega$  est raccordée au secondaire.

3) L'enroulement primaire d'un transformateur possède 2 fois plus de spires que le secondaire. La tension primaire est de 230 V. Le secondaire est raccordé à une résistance de  $5 \Omega$ .

Calculer la puissance apparente et active débitée par le transformateur ainsi que les courants primaire et secondaire ?

4) Un transformateur de 3000 kVA a un rapport de transformation de 60 kV à 2,4 kV.

Calculer le courant nominal de chaque enroulement.

5) Un transformateur moyenne tension possède une tension de sortie de 230 V aux bornes d'une bobine de 660 spires. La bobine primaire a 18000 spires.

Calculer :

La tension du primaire.

Le rapport de transformation.

6) Un transformateur de 500 VA a des pertes fer de 10 W et des pertes s'élevant à 20 W. Le facteur de puissance du transformateur est de 0,8.

Calculer :

Le rendement du transformateur.

7) Un transformateur de 300 kVA a des pertes fer de 2 kW et des pertes cuivre de 6,5 kW. Une charge, d'un facteur de puissance de 0,6 est raccordée à ce transformateur pendant 5000 h. Il est raccordé au réseau sans interruption toute l'année.

Quel est son rendement annuel ?

8) Un transformateur à une bobine secondaire de 688 spires placée sur un noyau en fer de  $9 \text{ cm}^2$  d'aire. L'induction magnétique dans le noyau est de 1,6 T a une fréquence de 50 Hz. Calculer :

La tension aux bornes de la bobine du secondaire.

9) Un appareil d'une tension nominale de 145 V doit être raccordé à un réseau de 230 V par l'intermédiaire d'un autotransformateur dont l'enroulement a 480 spires. Combien y a-t-il de spires entre les 2 bornes à 145 V ?