

## Chapitre 2 : Les Circuits Magnétiques

### 1. Production d'un champ magnétique

Si on considère un conducteur cylindrique droit dans lequel circule un courant  $I$  (figure 2.1). Ce courant crée un champ magnétique. L'intensité de ce champ est donnée par la loi D'Ampère :

$$\int H dl = I$$

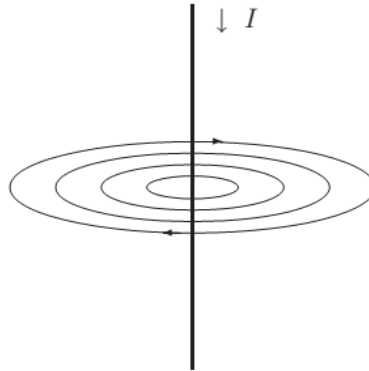


Fig. 2.1 Champ magnétique créé par un courant circulant dans un fil

Dans le cas d'un conducteur droit, l'intensité du champ magnétique est :

$$H(r) = \frac{I}{2r\pi} \left( \frac{A}{m} \right)$$

La nature du champ magnétique dépend de la nature du courant  $I$ . Si le courant  $I$  est un courant alternatif sinusoïdal, le champ magnétique sera sinusoïdal aussi. Si le courant est continu, le champ magnétique le sera aussi.

Le champ magnétique créé par un fil long et droit n'est pas uniforme et son intensité varie selon  $1/r^2$ . Afin de créer un champ uniforme, on utilise une bobine pour concentrer les lignes de champs en un même endroit.

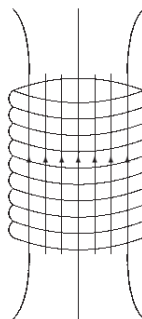


Fig. 2.2 Le champ magnétique dans une bobine

A l'intérieur de la bobine, les champs magnétiques s'additionnent pour créer un champ plus intense et plus uniforme.

## 2. Flux magnétique

On prend l'exemple d'une bobine dans laquelle circule un courant  $I$ . Le champ magnétique créé se répand dans l'espace libre autour de la bobine, ou de façon analogue aux courants électriques, que le champ "coule" dans le milieu qui entoure la bobine. La bobine crée alors une force magnétomotrice qui fait circuler un flux magnétique dans le milieu.

C'est semblable au même phénomène que les circuits électriques : une force électromotrice déplace des électrons qui circulent dans le milieu.

La force produite est reliée au courant qui circule et au nombre de tours dans la bobine :

$$F = NI$$

Où  $F$  est la force,  $N$  est le nombre de tours, et  $I$  le courant. L'unité de cette force est A.t (Ampère-tour).

La densité de flux magnétique  $B$  dans un milieu donnée est :

$$B = \mu H$$

Où  $B$  est la densité de flux (en Wb/m<sup>2</sup> ou Tesla),  $H$  est l'intensité du champ magnétique (en A/m) et  $\mu$  est la perméabilité magnétique du milieu (en Wb/m ou H/m).

La perméabilité du vide est  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  H/m. La perméabilité de l'air est presque la même que celle du vide.

Le flux magnétique circulant dans une surface  $S$  est défini comme :

$$\Phi = \int_S B \cdot ds$$

## 3. Induction magnétique B

Considérons un volume élémentaire  $dV$  de matière aimantée par un champ excitateur  $B_{\text{ext}}$ . On peut définir  $dV$  par le produit  $dx \cdot dS$  où  $dx$  est la longueur du cylindre et  $dS$  la surface de sa section droite de telle sorte que  $dx \gg dS$ . Il peut être considéré comme un solénoïde de longueur  $dx$  ayant  $dN$  spires parcourues par le courant  $I$ .

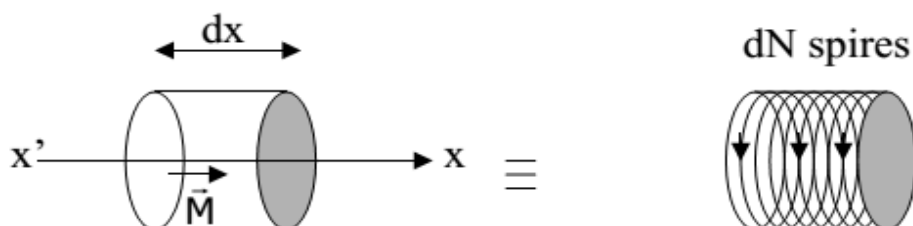


Fig 2.3 Cylindre uniformément aimanté le long de son axe

Solénoïde parcouru par un courant  $I$

L'induction magnétique créée par le solénoïde d'ampériens locaux s'écrit à l'intérieur de son volume:

$$\vec{B}_l = \mu_0 \frac{dN}{dx} I \vec{u}_x$$

$$d\vec{m} = dN \cdot I \cdot dS \vec{u}_x$$

Par ailleurs le moment magnétique de ce solénoïde élémentaire s'écrit ;

Le milieu présente donc une aimantation :

$$\vec{M} = \frac{d\vec{m}}{dV} = \frac{dN \cdot I \cdot dS \vec{u}_x}{dS \cdot dx} = \frac{dN}{dx} I \vec{u}_x$$

On obtient donc :

$$\vec{B}_l = \mu_0 \vec{M}$$

Cette induction est la réponse du milieu à l'excitation et est colinéaire et proportionnelle à l'aimantation qu'a induit  $B_{ext}$

L'induction magnétique totale est la superposition des deux inductions :  $\vec{B} = \vec{B}_{ext} + \vec{B}_l$

#### 4. Champ magnétique H

Contrairement à l'induction, le champ magnétique continue à vérifier dans la matière le théorème d'Ampère au sens des courants libres, c'est-à-dire qu'il ignore les courants d'aimantation ;

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}_{ext}}{\mu_0}$$

L'induction magnétique totale s'écrit donc :  $\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M})$

#### 5. Courants d'aimantation

Ces courants microscopiques induits par le champ exciteur sont « fictifs » dans la mesure où ils ne sont pas observables puisqu'internes aux atomes et aux molécules.

Ils sont réels dans la mesure où ils créent l'induction magnétique  $B_l$ .

#### 6. Matériaux magnétiques

Un matériau magnétique est un matériau de haute perméabilité magnétique ( $\mu_r \gg 1$ ). Le rôle est de canaliser efficacement les lignes de champ magnétique. Ceci permet de réduire les fuites.

La caractéristique de magnétisation AC d'un matériau magnétique donne une courbe du type hystérésis.

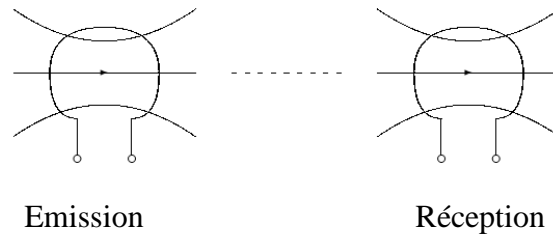


Fig.2.4 Sans matériau magnétique

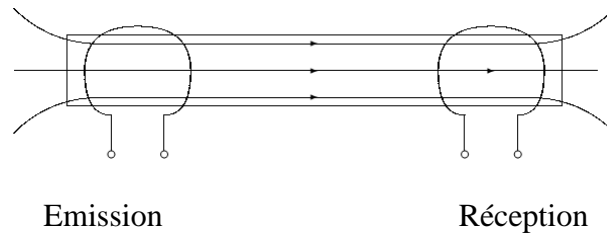


Fig .2.5 Avec un matériau magnétique

### 6.1 Caractéristique B(H) d'un matériau magnétique

On a vu que la relation entre la densité de flux et le champ magnétique est  $B = \mu H$ . Dans le vide (ou l'air), cette caractéristique prend la forme d'une relation linéaire. Le vide est un milieu linéaire, homogène (la qualité est uniforme) et isotropique (les propriétés sont les mêmes dans toutes les directions). La relation B(H) du vide est donnée dans la figure suivante.

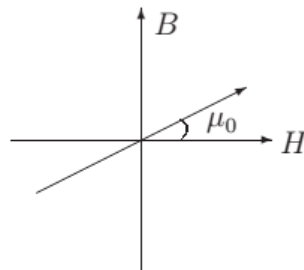


Fig. 2.6 Relation B(H) du vide.

Pour un matériau magnétique, la relation B(H) est :

$$B = \mu_r \mu_0 H$$

Où  $\mu_r$  est la perméabilité relative du matériau. Pour la plupart des matériaux, la perméabilité n'est pas constante, et la relation B(H) est non-linéaire.

On peut classer les matériaux magnétiques en deux groupes importants :

- matériaux non-magnétiques :  $\mu_r$  est environ 1. Exemple : air, verre, cuivre, aluminium.
- matériaux ferromagnétiques :  $\mu_r$  est très élevé (100 à 100000). Exemple : fer, acier, cobalt, alliages, etc...

La caractéristique de magnétisation AC d'un matériau magnétique donne une courbe du type hystérésis.

- $B_{\text{sat}} = 1.5\text{T}$  (fer)
- $B_{\text{sat}} = 0.3\text{T}$  (ferrite)

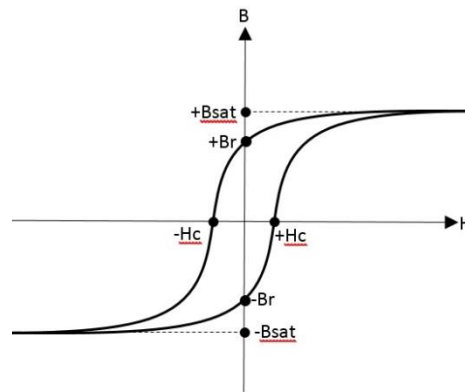


Fig. 2.7 Courbe hystérésis typique

## 6.2 Pertes magnétiques

Il y a deux grandes sources de pertes dans les matériaux magnétiques :

- Pertes par hystérésis
- Pertes par courants de Foucault

## 6.3 Pertes par hystérésis

Sous excitation cyclique (sinusoïdale, par exemple), le matériau magnétique fait un cycle d'hystérésis et crée ainsi des pertes d'énergie dans le noyau sous forme de chaleur. Les pertes par hystérésis sont directement proportionnelles à la surface du cycle d'hystérésis et à la fréquence d'opération. Une formule empirique permet de calculer les pertes (par  $\text{m}^3$ ) :

$$P_{\text{hys}} = K B_{\text{sat}}^2 f$$

Où  $K$  est une constante qui dépend du matériau,  $B_{\text{sat}}$  est la valeur maximale de la densité de flux, et  $f$  est la fréquence de fonctionnement.

### *Pertes par courants de Foucault*

Le champ magnétique alternatif induit dans le noyau par des forces électromagnétiques crée un courant induit dans le matériau. Ces courants induits créent des pertes  $RI^2$  (puisque les matériaux magnétiques ont une résistivité non-nulle). Ces pertes sont dissipées sous forme de chaleur.

## 7. Circuits magnétiques

Un circuit magnétique est semblable à un circuit électrique. C'est un parcours fermé qui est réalisé avec un matériau magnétique de haute perméabilité. Cependant, on va faire quelques hypothèses pour l'analyse de ces circuits :

- On suppose que  $B(H)$  est linéaire.
- Pas de saturation.
- Pas de hystérésis.

Donc, comme équivalence aux circuits électriques :

Circuit électrique	Circuit magnétique
Tension V	Force magnétique $F=NI$
Résistance R	Réductance $\mathbf{R}$
Courant I	Flux $\varphi$

### 7.1 Réductance en série

La réductance en série se comporte de la même façon que des résistances en série. C'est-à-dire

$$\mathbf{R}_{eq} = \mathbf{R}_1 + \mathbf{R}_2 + \dots$$

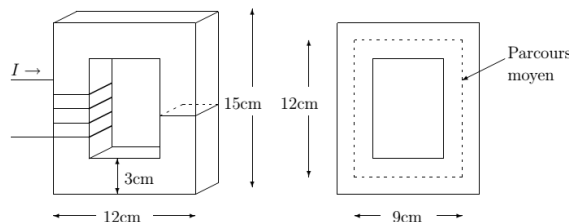
### 7.3 Réductance en parallèle

La réductance en parallèle se comporte de la même façon que des résistances en parallèle. C'est-à-dire :

$$\mathbf{R}_{eq} = \left( \frac{1}{\mathbf{R}_1} + \frac{1}{\mathbf{R}_2} \right)^{-1}$$

#### Exemple 1

Soit le circuit magnétique suivant. Le courant I est 1.2A, la perméabilité relative du matériau est  $\mu_r = 3000$ , le nombre de tours N est 100 et une profondeur de 4cm.



La longueur moyenne du circuit est :

$$l = 2 \cdot (12 + 9) = 0.42\text{m}$$

La section du circuit est :

$$A = (3 \cdot 4)\text{cm}^2 = 0.0012\text{m}^2$$

La réductance du circuit est :

$$\mathbf{R} = \frac{l}{\mu A} = \frac{0.42}{3000(4\pi \times 10^{-7})0.0012} = 92840 \text{ At/Wb}$$

Le flux magnétique est :

$$\varphi = \frac{NI}{R} = \frac{120}{92840} = 1.29 \times 10^{-3} \text{Wb}$$

La densité de flux est :

$$B = \frac{\varphi}{A} = \frac{1.29 \times 10^{-3}}{0.0012} = 1.0875 \text{ T}$$

## 8. Inductance d'une bobine

On considère une bobine de  $N$  tours dans laquelle circule un courant  $I$ . La bobine se trouve dans un milieu magnétiquement linéaire (comme l'air). Le flux magnétique produit par la bobine est  $\varphi$ . Le flux produit par la bobine traverse la bobine. Le flux magnétique total couplé à la bobine est  $\Lambda = N\varphi$ . L'inductance de la bobine est définie par :

$$L = \frac{\Lambda}{I} = \frac{N\varphi}{I} = \frac{N^2}{R}$$

Dans le cas d'une inductance  $\mu_a$  air (où le milieu magnétique est de l'air), la valeur de l'inductance est fonction du nombre de tours et de la perméabilité du milieu. Elle est aussi indépendante de la fréquence et du courant. Par contre, la réluctance est difficile à calculer parce que le flux suit un parcours pas bien défini.

Dans le cas d'une bobine sur un matériau magnétique, le flux est très concentré dans le matériau magnétique. Le flux crée par la bobine circule donc en totalité dans le noyau. Le flux total couplé à la bobine est égal à :

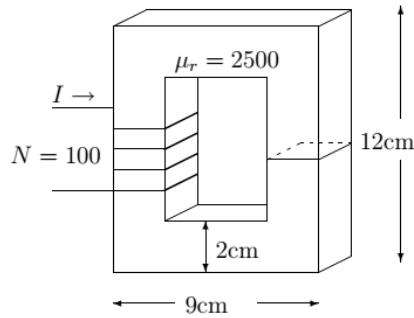
$$L = \frac{\Lambda}{I} = \frac{N\varphi}{I} = \frac{N^2}{R}$$

comme dans le cas d'une bobine à air. Par contre, la réluctance n'est pas constante ; elle dépend du courant  $I$  parce que la perméabilité du matériau n'est pas linéaire.

Par contre, on peut approximer la valeur de l'inductance en supposant que la relation  $B(H)$  est linéaire.

### Exemple 2

Le circuit a une profondeur de 2cm. On suppose que le matériau magnétique est linéaire.



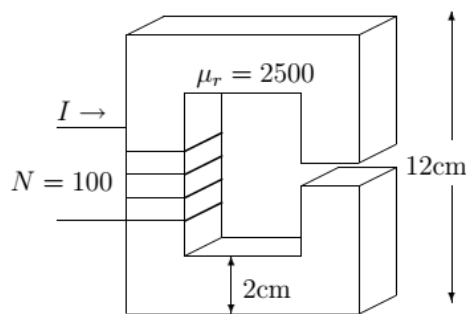
La réluctance du circuit est :

$$R = \frac{l}{\mu A} = \frac{0.34}{(2500)(4\pi \times 10^{-7})(0.0004)} = 270563 \text{ At/Wb}$$

L'inductance est :

$$L = \frac{N^2}{R} = \frac{100^2}{270563} = 37 \text{ mH}$$

On ajoute un entrefer de 1 mm.



La réluctance du noyau est la somme des réluctances (celle du noyau de fer et celle de l'entrefer).

$$R = R_{Fe} + R_e$$

O a :

$$R_e = \frac{l_e}{\mu_0 A} = \frac{0.001}{(4\pi \times 10^{-7})(0.0004)} = 1.989 \times 10^6 \text{ At/Wb}$$

L'inductance est :

$$L = \frac{N^2}{R_{Fe} + R_e} = \frac{100^2}{270563 + 1.989 \times 10^6} = 4.42 \text{ mH}$$



## Chapitre 3: Les Transformateurs

### 1. Le transformateur

Le transformateur est une machine statique permettant d'élever ou d'abaisser la tension ou l'intensité d'un courant alternatif.

Le transformateur monophasé

#### 1.1 Constitution

Un circuit magnétique canalise le flux. Il est constitué par des tôles minces au silicium, parfois à grains orientés pour éviter les pertes par hystérésis et courant de Foucauld. Ces tôles sont isolées par leur oxydation (pour les petits transformateurs) ou par des vernis spéciaux dans les gros transformateurs. Elles sont frettées avec des tiges et des écrous.

#### 1.2 Principe

Les nombres de spires des deux enroulements,  $N_1$  et  $N_2$  sont différents. L'enroulement qui en comporte le plus est du côté de la tension la plus élevée, il est en fil plus fin que l'autre enroulement de tension plus petite.

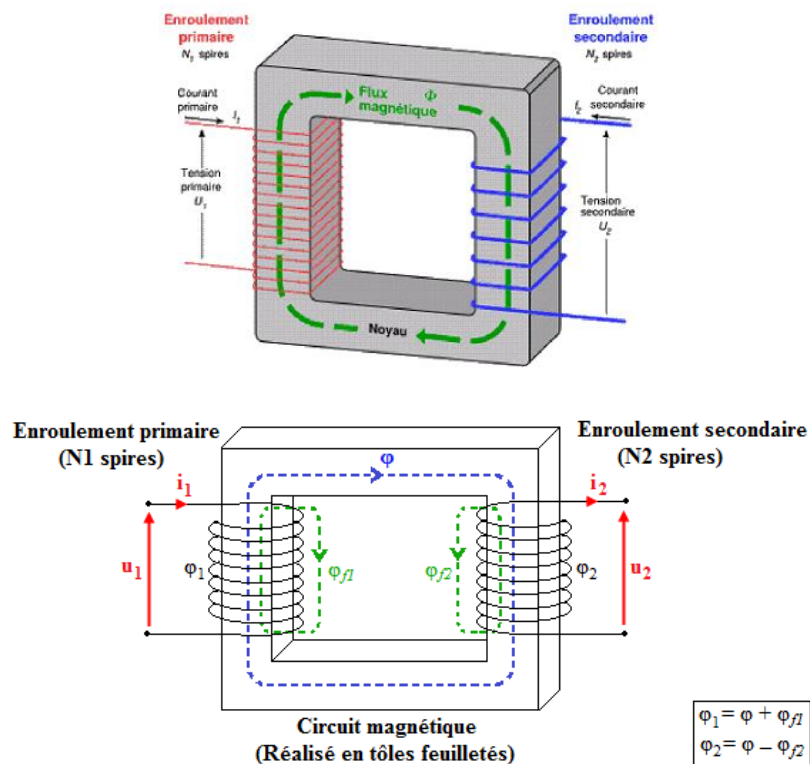


Fig 3.1 Schéma de principe

Considérons un noyau ferromagnétique fermé sur lequel on a disposé deux bobinages.

Si on alimente l'un de ces bobinages, appelé « primaire » au moyen d'une différence de potentiel sinusoïdale, il y circule un courant  $I_1$  qui crée dans le noyau un flux magnétique

également sinusoïdal. Ce flux variable induit dans chacun des bobinages une f.é.m. alternative proportionnelle au nombre de spires.

Dans le bobinage primaire, il s'agit d'une f.c.é.m. qui s'oppose à la tension d'alimentation.

*Le primaire se comporte comme un récepteur*  $U_1 = E_1 + (r_1 \cdot I_1)$

*Le secondaire se comporte comme un générateur*  $U_2 = E_2 - (r_2 \cdot I_2)$

En modifiant le nombre de spires des deux bobinages, on peut obtenir des tensions sinusoïdales de valeurs différentes.

L'appareil est donc, d'abord, un transformateur de tension. Si on fait débiter le secondaire, on peut appliquer le principe de conservation de l'énergie. Il s'ensuit que les intensités dans les bobinages doivent varier en sens inverse des tensions. L'appareil est donc, aussi un transformateur d'intensité.

## 2. Fonctionnement du transformateur réel en charge

### 2.1 Pertes dans le transformateur

#### a- Les pertes dans le fer

Le circuit magnétique s'échauffe sous l'effet :

- des pertes par hystérésis,
- des pertes par courants de Foucault.

Pour diminuer les pertes :

- on feuillette le circuit magnétique ;
- on limite l'induction supérieure maximum à une valeur telle que les pertes par hystérésis et courants de Foucault restent acceptables ;
- on utilise pour construire le circuit magnétique des tôles à faibles pertes : au silicium ou à cristaux orientés.

Remarque : Les pertes dans le fer ne dépendent que de la fréquence et du flux, ceux-ci étant constants quel que soit le fonctionnement du transformateur.

#### b- La résistance des enroulements

Au primaire :  $I_1$  va créer une chute de tension  $R_1 \cdot I_1$ , à déduire de la tension d'alimentation  $U$

$$\vec{U} = \vec{E} + \overrightarrow{R_1 \cdot I_1} \rightarrow \vec{E} = \vec{U} - \overrightarrow{R_1 \cdot I_1}$$

$P = R_1 \cdot I_1^2 \rightarrow$  représente la perte de puissance due à l'effet joule

Au secondaire :  $I_2$  va créer une chute de tension  $R_2 I_2$ , à déduire de la fém.  $E_2$  produite.

donc, la tension disponible au secondaire s'appellera  $U_2$  sera :

$$\vec{U}_2 = \vec{E}_2 + \vec{R}_2 \cdot \vec{I}_2$$

La perte de puissance par effet joule sera  $R_2 I_2^2$

**c- Les fuites magnétiques**

Au primaire : certaines lignes d'induction engendrées par le primaire se referment sur lui-même sans passer par le secondaire.

On considère que le primaire contient une réactance de self :  $\omega L_1$

Au secondaire : on constate le même phénomène qu'au primaire.

Aussi, pour le secondaire, on considère qu'il y a une réactance de self :  $\omega L_2$

**2.2 Conclusions**

On peut assimiler le transformateur à l'ensemble ci-dessous.

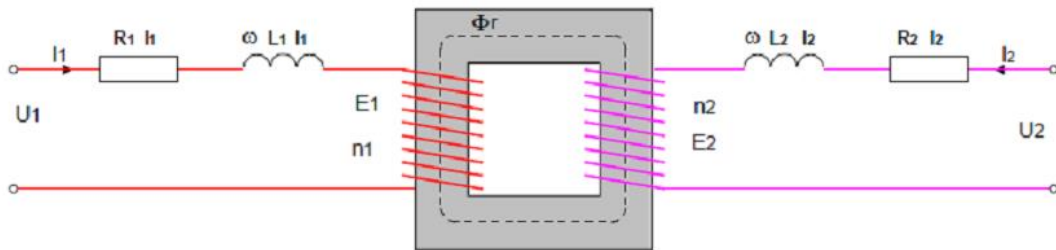


Fig 3.2 Circuit équivalent de principe

Récepteur

$$U_1 = E_1 + R_1 \cdot I_1 + \omega L_1 \cdot I_1$$

ou

Générateur

$$E_2 = U_2 + R_2 \cdot I_2 + \omega L_2 \cdot I_2$$

$$U_2 = E_2 - R_2 \cdot I_2 - \omega L_2 \cdot I_2$$

**2.3 Le rendement d'un transformateur**

$$\eta = \frac{P_u}{P_{abs}} \rightarrow \eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + F + C}$$

$P_2$  = Puissance au secondaire

$P_1$  = Puissance au primaire

F = pertes dans le fer

C = pertes dans le cuivre

### 3. Types de transformateurs

#### 3.1 L'auto transformateur

Il ne comporte qu'un seul enroulement. La borne A est commune au primaire et au secondaire, une prise intermédiaire B correspond à la plus petite des deux tensions.

$$U_1 = E + E_2$$

$$U_2 = E_2$$

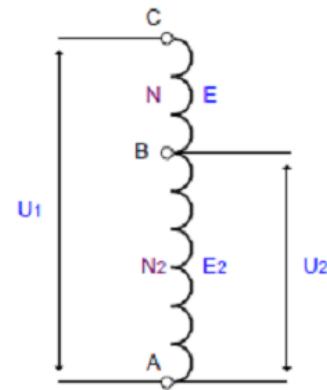
$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{E + E_2}{E_2} = \frac{N + N_2}{N_2}$$

Appareil simple et peu coûteux.

Il peut être dangereux : si N2 est coupé, U2 = U1

Il n'y a pas d'isolation entre les circuits.

Il ne peut être utilisé dans les installations domestiques.

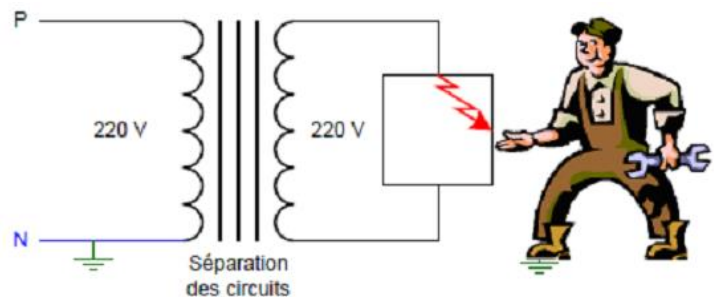


#### 3.2 Le transformateur d'isolement

Il est construit de manière à obtenir une séparation électrique entre les enroulements primaires et secondaires.

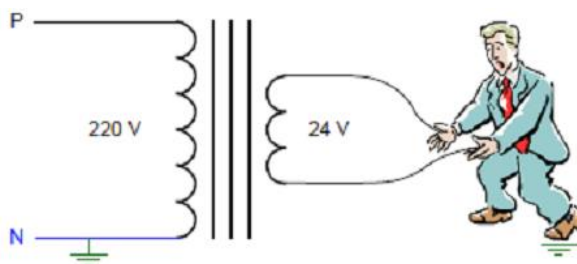
*Pas de danger d'électrocution,  
en cas de défaut sur une phase.*

Un défaut d'isolement côté primaire n'a pas d'influence sur le secondaire.



#### 3.3 Le transformateur de sécurité

Il est destiné à alimenter un circuit de distribution, un appareil d'utilisation ou un autre équipement en très basse tension (TBT < 50 V).



Le contact sur les deux phases peut être supporté sans danger.

### 3.4 Le transformateur de mesure

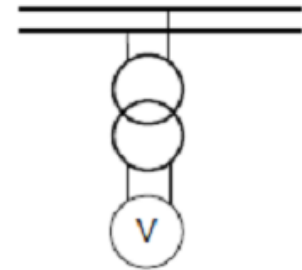
#### a. Le transformateur de potentiel (TP) ;

Surtout utilisé pour la mesure et le comptage en haute tension. Les limites de l'isolation d'un voltmètre et la sécurité de l'utilisateur interdisent la mesure directe des tensions élevées.

On abaisse donc la tension à mesurer à une valeur raisonnable par un transformateur de potentiel.

Le circuit magnétique est calculé largement et est très soigné de façon que les fuites soient pratiquement nulles.

Les deux enroulements doivent être rigoureusement isolés entre eux et par rapport à la carcasse.



#### b. Le transformateur d'intensité (TI)

Le courant dans un fil de ligne peut être très élevé et d'autre part sa mesure directe présenterait les mêmes dangers que celle d'une tension.

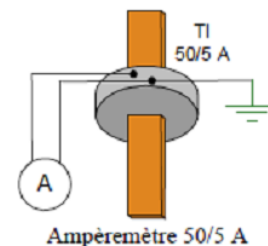
On interpose entre le fil et l'ampèremètre un TI. Comme on veut avoir  $I_2 < I_1$ ,

il faut que  $m = \frac{I_1}{I_2}$  soit très grand.

Le primaire est généralement constitué par une seule spire, c'est le fil de ligne (ou la barre du jeu de barres) qui traverse le circuit magnétique sur lequel est bobiné le secondaire.

Le calibre de l'ampèremètre est généralement 5 A.

Il est dangereux d'ouvrir le circuit secondaire d'un TI, car une tension très élevée apparaît entre ses bornes.



*Il faut court-circuiter le secondaire si l'ampèremètre doit être enlevé du circuit.*

*On ne met pas de fusible au secondaire d'un TI.*

*Une des bornes sera reliée à la terre.*

#### c. La pince ampérométrique

C'est un transformateur d'intensité permettant de mesurer un courant sans couper le fil.

#### 4. Mise en parallèle de deux transformateurs monophasés

Pour être couplés en parallèle, les deux transformateurs doivent avoir des caractéristiques identiques :

1/ **Même tension nominale primaire** : les deux primaires étant branchés

sous la même source de courant.

2/ **Même rapport de transformation** : les f.e.m doivent être égales

afin d'éviter tout courant de circulation à vide

(débit d'une bobine dans l'autre)

3/ **Même tension de court-circuit** : sachant que  $Z \cdot I_2 = U_{cc} \cdot N_2/N_1$ ,

si les chutes de tensions nominales ne sont pas identiques,

le transformateur ayant la plus faible chute de tension risque d'être surchargé.

4/ **Même indice horaire ou indice rattrapable**, sinon court-circuit et donc destruction des transformateurs

5/ **Même puissance nominale** sinon le transformateur le plus puissant sera surchargé. Cependant, on peut admettre sur le plan pratique, un écart maximal de l'ordre de 40%.

