

# **ELECTROTECHNIQUE**

## **GE\_GM**

### **Chapitre 4**

## **Transformateur monophasé**

Prof Ali NEJMI

# Transformateur monophasé

## **I – Introduction**

## **II – Convention de signe**

## **III – Fonctionnement à vide**

- 1- Equations de fonctionnement
- 2- Courant primaire à vide
- 3- Diagramme vectoriel et schéma équivalent

## **IV – Fonctionnement en charge**

## **V - Etude du transformateur dans l'approximation du Kapp**

- 1- Equation - Diagramme vectoriel et schéma équivalent
- 2- Etude de la chute de tension
- 3- Etude du rendement

# Transformateur monophasé

## **VI – Détermination pratique des caractéristiques en charge d'un transformateur**

- 1- Essai à vide
- 2- Essai en C.C

## **VII – Utilisation et réalisation des transformateurs monophasés**

- 1- Utilisation
- 2- Grandeurs nominales
- 3- Grandeurs réduites
- 4- Réalisation

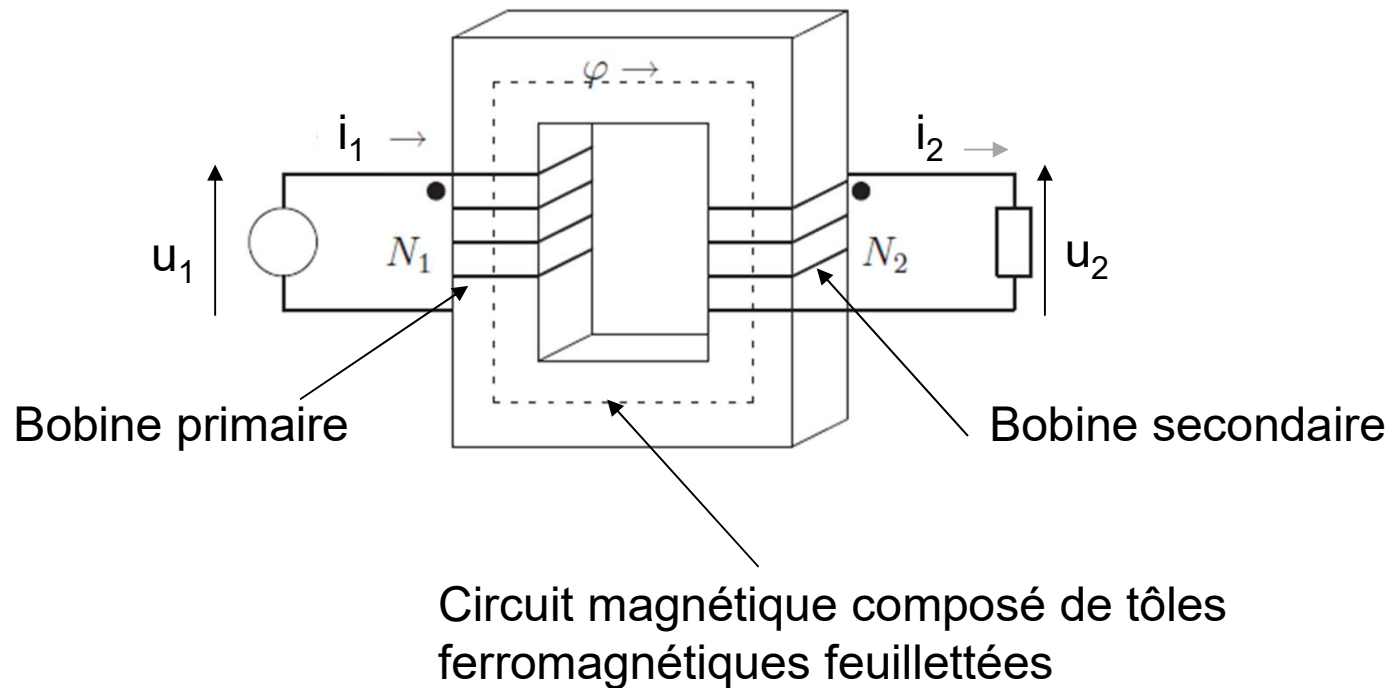
## **VIII – Couplage en parallèle de 2 transformateurs monophasés**

# I- Introduction

- Un transformateur est une machine statique qui réalise le transfert d'énergie électrique par voie électromagnétique. Il permet de transformer une tension et un courant alternatifs en une tension et un courant alternatifs de même fréquence mais de valeurs efficaces généralement différentes.
- Le transformateur est utilisé à chaque fois qu'on veut modifier la présence de l'énergie électrique alternative pour la rendre plus commode à l'utilisation. C'est cette facilité de transformation qui explique l'utilisation de l'alternatif dans les réseaux de distribution
- Un transformateur monophasé comporte un circuit magnétique feuilleté sur lequel sont montés deux enroulements: l'enroulement relié à la source appelé « Primaire » et l'enroulement relié à la charge appelé « secondaire».

# I- Introduction

- Structure schématique d'un transformateur

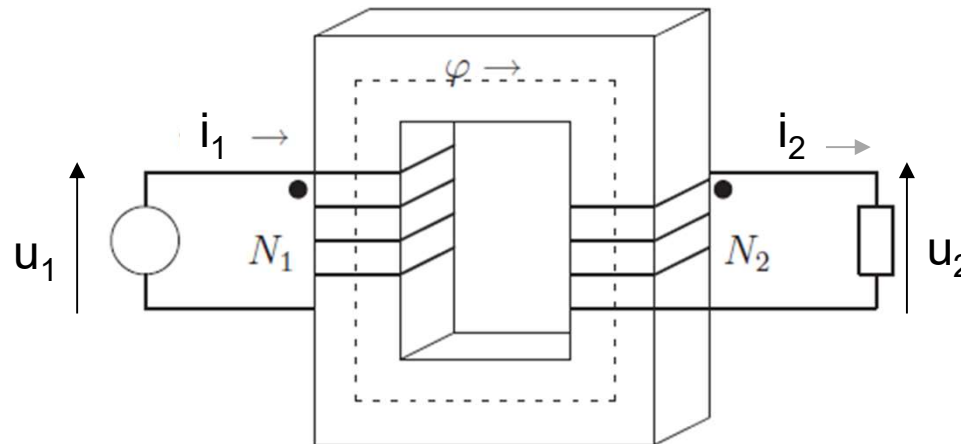


Le flux  $\varphi$  est le flux mutuel.

Le ● indique la polarité des tensions. Par convention, un courant qui entre dans un ● indique un flux positif.

# I- Introduction

- Structure schématique d'un transformateur



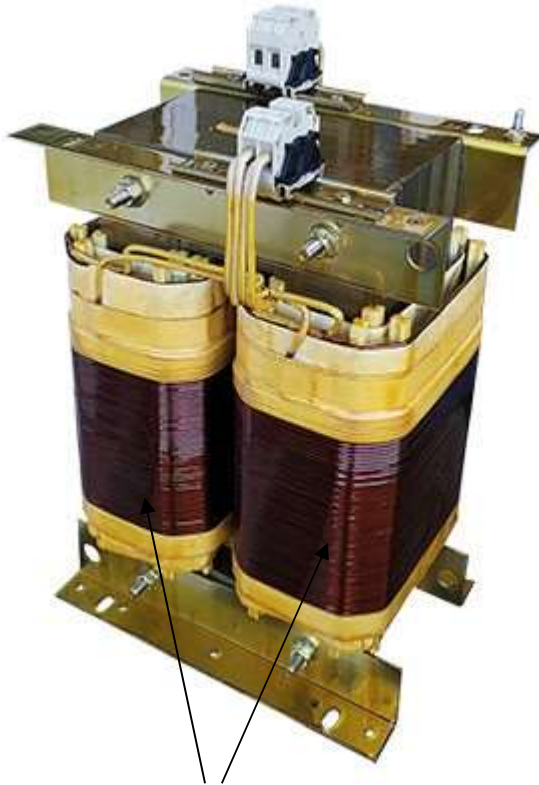
Grandeur primaires :  $i_1$  et  $U_1$

Grandeur secondaires :  $i_2$  et  $U_2$

Dans le primaire on adopte la convention récepteur, et la convention générateur au secondaire

# I- Introduction

- Structure schématique d'un transformateur



Bobines



Circuit magnétique composé de tôles ferromagnétiques feuilletées

# I- Introduction

- Structure schématique d'un transformateur



Tôle feuilletée



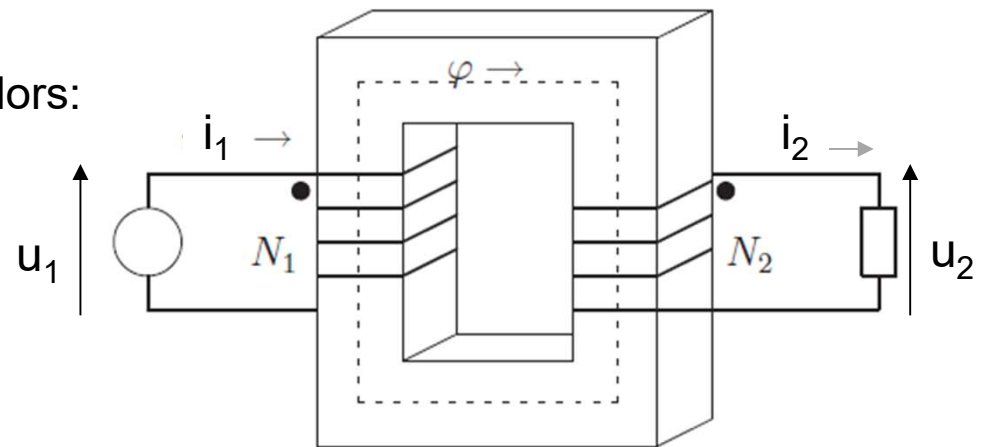
Circuit magnétique composé de tôles ferromagnétiques feuilletées



# I- Introduction

Si  $u_2 > u_1 \rightarrow i_2 < i_1$  le transformateur est alors:

- élévateur de tension
- abaisseur de courant



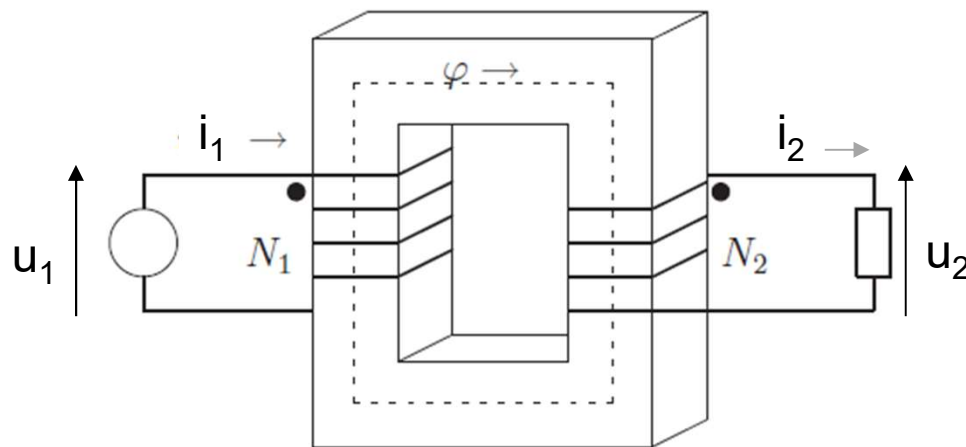
C'est par exemple le cas des transformateurs pour tubes luminescents: ces tubes, contenant un gaz rare (néon, argon...) doivent être alimentés sous une tension atteignant une dizaine de milliers de volts alors que le secteur ne délivre que 220 V

# I- Introduction

Si  $u_2 < u_1 \rightarrow i_2 > i_1$  le transformateur est alors:

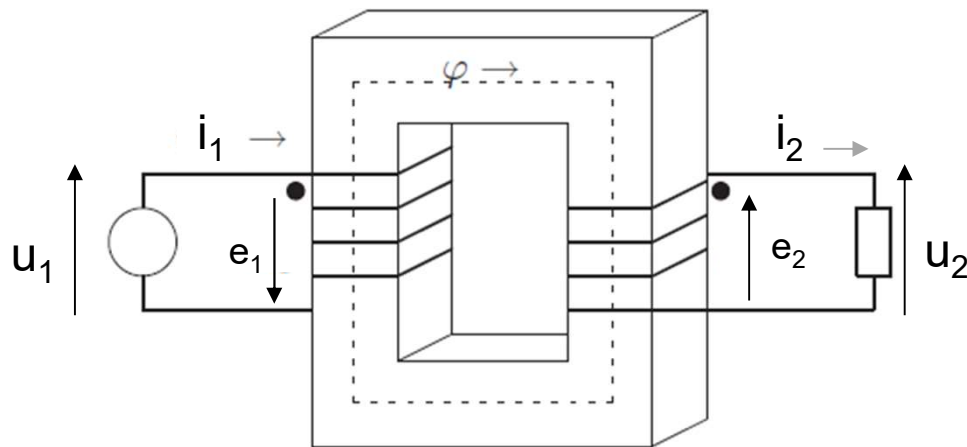
- abaisseur de tension
- élévateur de courant

C'est le cas des transformateurs de soudure qui débitent, au secondaire, un courant très intense (2000A par exemple), alors que le secteur alimentant le primaire ne peut fournir que quelques dizaines d'ampères (20A par exemple).



## II- Convention de signe

- On choisit un sens positif pour les lignes d'induction  $\varphi$
- On en déduit d'après la règle du tire-bouchon le sens positif des courants primaire et secondaire.
- Le sens positif des tensions est défini en adoptant la convention « récepteur » pour le primaire et le générateur pour le secondaire
- Les f.e.m  $e_1$  et  $e_2$  induites dans les enroulements primaire et secondaire sont orientées respectivement dans le même sens que  $i_1$  et  $i_2$



# III- Fonctionnement à vide

## 1) Equations:

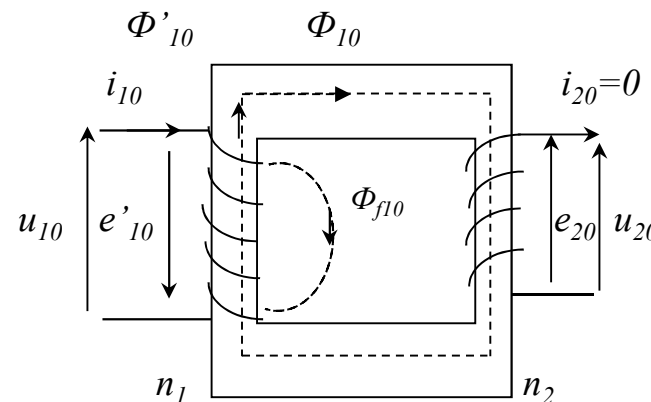
À vide, c'est-à-dire  $i_2=0$

Les ampères tours  $n_1 i_{10}$  créent le flux propre  $\phi'_{10}$  dans l'enroulement primaire de résistance  $r_1$ . Ce flux se décompose en un flux principal  $\Phi_{10}$  canalisé par le circuit magnétique et un flux de fuites auquel on peut associer une inductance de fuites partielles:

$$\ell_1 = \frac{n_1 \Phi_{f10}}{i_{10}}$$

### Remarque :

A vide, le courant  $i_{10}$  est très faible, comparé au courant en charge.



# III- Fonctionnement à vide

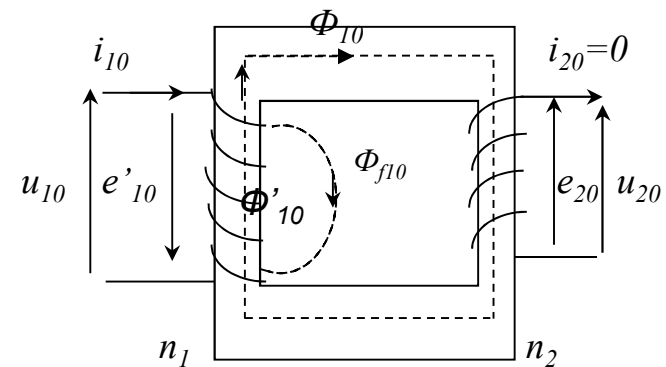
La loi d'ohm généralisée appliquée au circuit primaire et au circuit secondaire donne:

$$\left\{ \begin{array}{l} u_1 = -e'_{10} + r_1 i_{10} \\ u_{20} = e_{20} \end{array} \right. \quad \text{avec} \quad \left\{ \begin{array}{l} e'_{10} = -n_1 d\Phi'_{10}/dt \\ e'_{20} = -n_2 d\Phi_{10}/dt \end{array} \right.$$

$r_1$ : Résistance de la bobine du primaire

Sachant que  $\Phi'_{10} = \Phi_{10} + \Phi_{f10}$  et  $\ell_1 = n_1 \Phi_{f10} / i_{10}$

$$\left\{ \begin{array}{l} u_1 = n_1 d\Phi_{10}/dt + \ell_1 di_{10}/dt + r_1 i_{10} \\ u_{20} = e'_{20} \end{array} \right.$$



### III- Fonctionnement à vide

On pose:

$$e_{10} = n_1 d\Phi_{10}/dt \quad \text{et} \quad e_{20} = -n_2 d\Phi_{10}/dt$$

$$\left\{ \begin{array}{l} u_1 = e_{10} + \ell_1 di_{10}/dt + r_1 i_{10} \\ u_{20} = e_{20} \end{array} \right.$$

En régime sinusoïdal :

$$\left\{ \begin{array}{l} \underline{U}_1 = \underline{E}_{10} + j\ell_1 \omega \underline{I}_{10} + r_1 \underline{I}_{10} \\ \underline{U}_{20} = \underline{E}_{20} \end{array} \right\} \quad \text{avec} \quad \begin{array}{l} \underline{E}_{10} = jn_1 \omega \underline{\Phi}_{10} \\ \underline{E}_{20} = -jn_2 \omega \underline{\Phi}_{10} \end{array}$$

$$\frac{e_{20}}{e_{10}} = \frac{\underline{E}_{20}}{\underline{E}_{10}} = - \frac{n_2}{n_1} = - m$$

### III- Fonctionnement à vide

$m=n_1/n_2$  s'appelle le **rapport de transformation ou rapport du transformateur**.

Pour un transformateur de bonne qualité, les chutes de tension résistive  $r_1 I_{10}$  et inductive  $\ell_1 \omega I_{10}$  sont très faibles.

Donc:

$$\left\{ \begin{array}{l} u_1 \approx e_{10} = n_1 d\Phi_{10}/dt \\ u_{20} \approx e_{20} \approx -n_2 d\Phi_{10}/dt \end{array} \right.$$

Donc:

$$\left\{ \begin{array}{l} \underline{U}_1 \approx \underline{E}_{10} = jn_1 \omega \underline{\Phi}_{10} \\ \underline{U}_{20} = \underline{E}_{20} = -jn_2 \omega \underline{\Phi}_{10} \end{array} \right.$$

$$\frac{u_{20}}{u_{10}} = \frac{\underline{U}_{20}}{\underline{U}_{10}} = -\frac{n_2}{n_1} = -m$$

En valeur efficace:

$$\frac{U_{20}}{U_{10}} = m$$

# III- Fonctionnement à vide

Si le primaire est alimenté sous une tension sinusoïdale:  $u_1 = U_{1m} \cdot \cos(\omega t)$

sachant que  $u_1 \approx n_1 d\Phi_{10}/dt \rightarrow \Phi_{10} = \Phi_m \sin(\omega t)$  avec  $\Phi_m = U_{1m}/(n_1 \omega)$

Or  $\Phi_m = B_{max} \cdot S$  avec  $S$  est l'air de la section droite des noyaux

$$\text{Donc } U_{1m} = n_1 \omega B_{max} \cdot S = 2\pi n_1 \cdot f B_{max} \cdot S$$

## Formules de Boucherot

$$\begin{cases} U_{10} = \frac{U_{1m}}{\sqrt{2}} = 4.44 \cdot n_1 \cdot f \cdot B_{max} \cdot S \\ U_{20} = \frac{U_{20m}}{\sqrt{2}} = 4.44 \cdot n_2 \cdot f \cdot B_{max} \cdot S \end{cases}$$



# III- Fonctionnement à vide

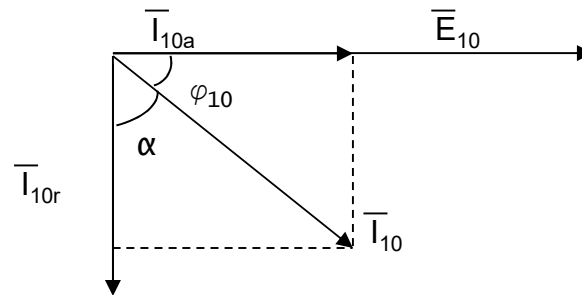
## 2) courant primaire à vide

Si  $u_1$  est une fonction sinusoïdale du temps,  $\Phi_{10}$  l'est aussi

$$\Phi_{10} = \Phi_m \sin(\omega t)$$

$$B = B_m \sin(\omega t)$$

$$e_{10} = E_m \cos(\omega t)$$



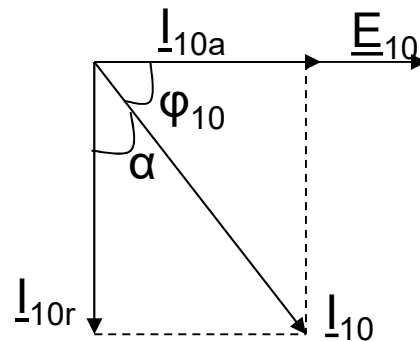
$\varphi_{10}$  est le déphasage entre  $i_{10}$  et  $e_{10}$  il est inférieur à  $\pi/2$

### III- Fonctionnement à vide

On peut décomposer  $i_{10}$  en 2 composantes: une composante active  $\underline{i}_{10a}$  et une composante réactive  $\underline{i}_{10r}$

$$i_{10} = i_{10a} + i_{10r} \quad \rightarrow \quad \underline{i}_{10} = \underline{i}_{10a} + \underline{i}_{10r}$$

$\alpha$  s'appelle l'angle hystérétique.  $\alpha = \pi/2 - \varphi_{10}$



# III- Fonctionnement à vide

## 3) Diagramme vectoriel et schéma équivalent

- Diagramme vectoriel

Le fonctionnement à vide est régi par les équations suivantes:

$$\underline{U}_1 = \underline{E}_{10} + j\ell_1\omega\underline{I}_{10} + r_1\underline{I}_{10}$$

$$\underline{I}_{10} = \underline{I}_{10a} + \underline{I}_{10r}$$

$$\underline{E}_{10} = jn_1\omega \underline{\Phi}_{10}$$

$$\Phi'_{10} = \Phi_{10} + \Phi_{f10}$$

$$\Phi_{f10} = \ell_1\underline{I}_{10} / n_1$$

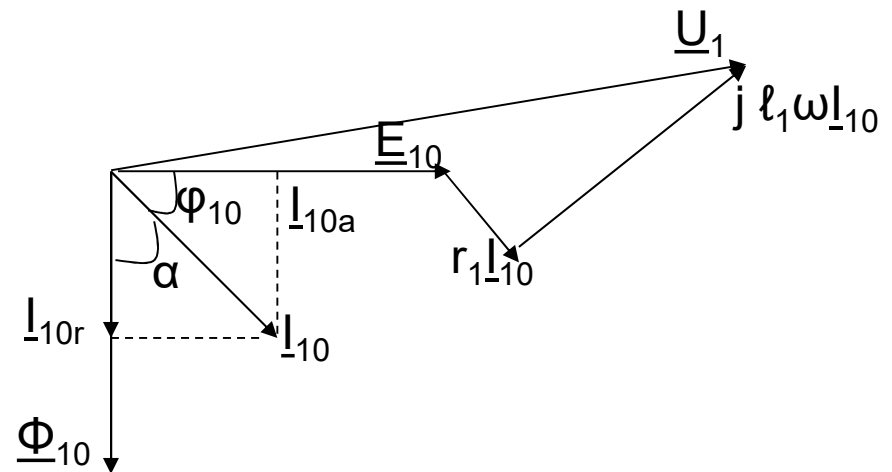


Diagramme vectoriel

# III- Fonctionnement à vide

Au secondaire on a :

$$\underline{U}_{20} = \underline{E}_{20}$$

$$\underline{E}_{20} = -j n_2 \omega \underline{\Phi}_{10}$$

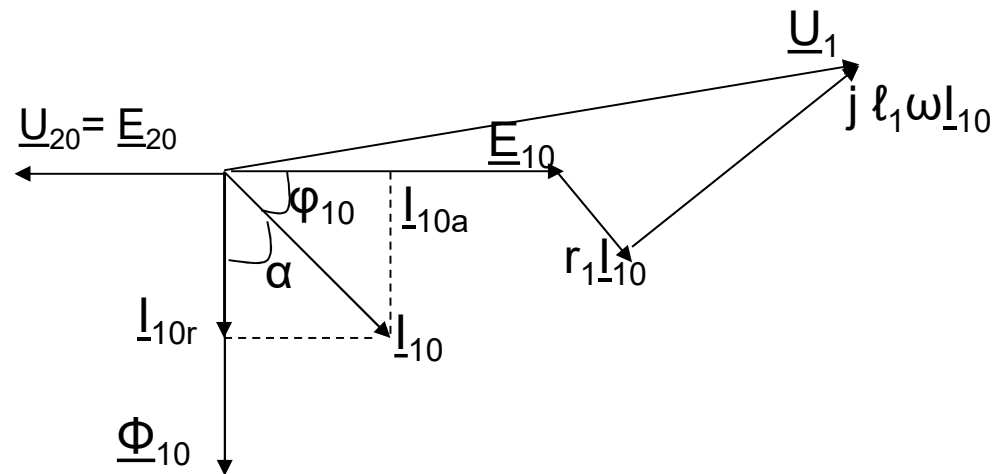
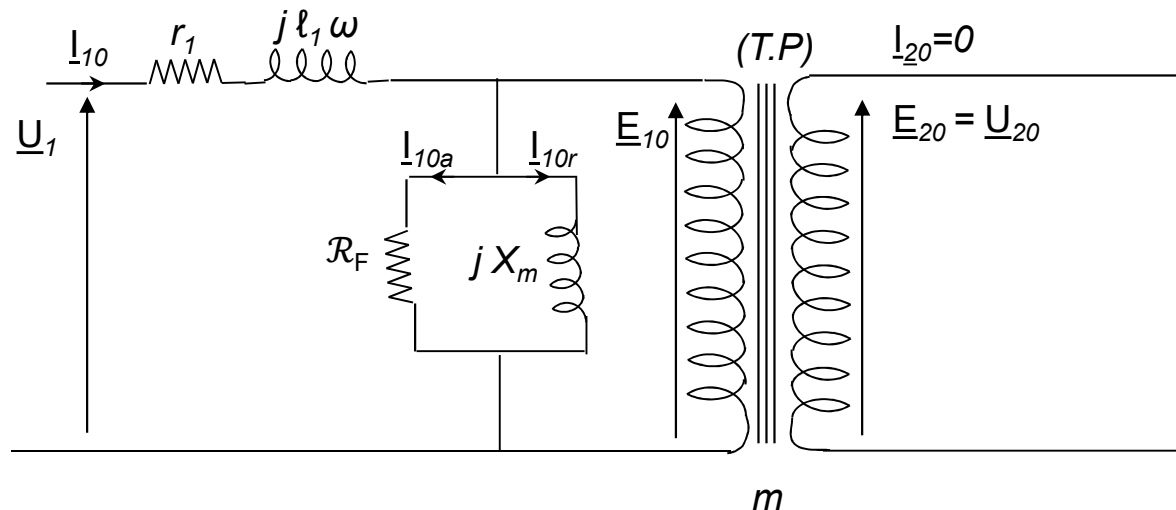


Diagramme vectoriel

# III- Fonctionnement à vide

- Schéma équivalent:



Le schéma équivalent comporte un transformateur parfait (T.P): c'est un transformateur sans chute de tension et sans pertes.

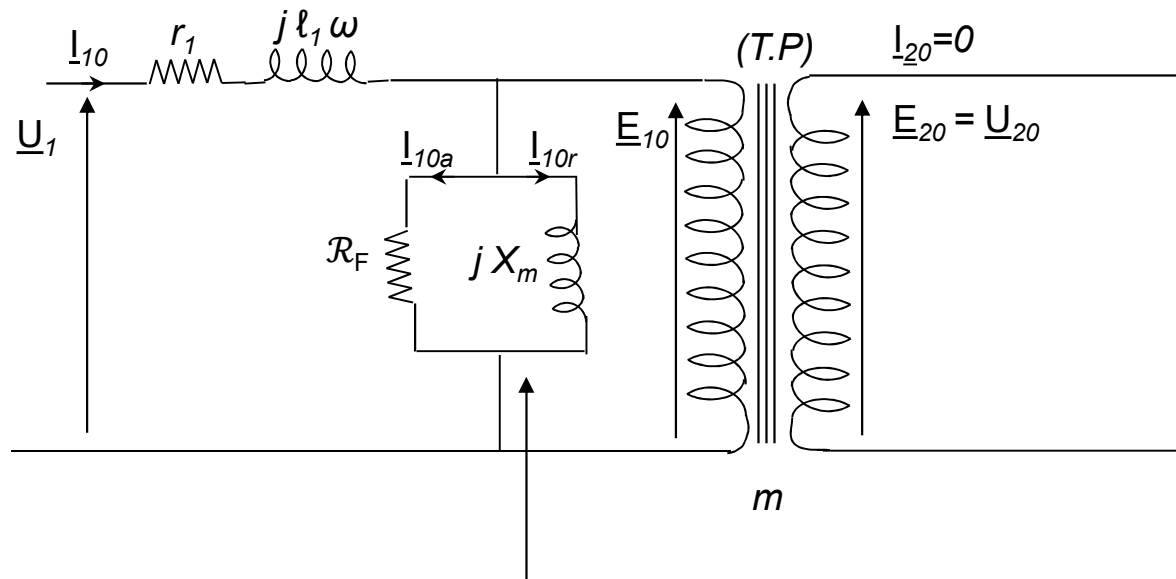
Le transformateur est à vide (on a débranché le récepteur du secondaire):  $i_2 = 0$

La résistance  $\mathcal{R}_F$  est traversée par le courant  $I_{10a}$  et consomme les **pertes fer  $P_{fer}$**

La réactance magnétique  $X_m$  est traversée par le courant  $I_{10r}$  et consomme la **puissance magnétique  $Q_m$** .

# III- Fonctionnement à vide

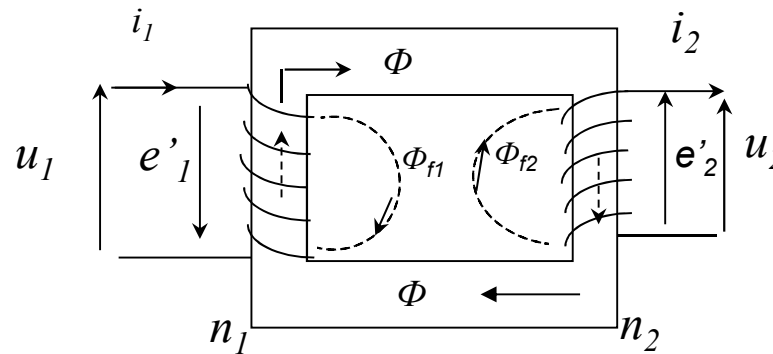
- Schéma équivalent:



La branche de magnétisation

## IV- Fonctionnement en charge

Le transformateur est **en charge** ( le secondaire débite un courant  $i_2$  dans le récepteur)



La f.m.m  $n_1 i_1$  engendrent le flux  $\Phi'_1 = \Phi_1 + \Phi_{f1}$

La f.m.m  $n_2 i_2$  engendrent le flux  $\Phi'_2 = \Phi_2 + \Phi_{f2}$

Le flux canalisé par le circuit magnétique est  $\Phi = \Phi_1 + \Phi_2$

Le flux réel traversant le primaire est  $\Phi_{1\text{tot}} = \Phi + \Phi_{f1}$

Le flux réel traversant le secondaire est  $\Phi_{2\text{tot}} = \Phi + \Phi_{f2}$

## IV- Fonctionnement en charge

Les équations des tensions:

$$\begin{cases} u_1 = -e'_1 + r_1 i_1 = n_1 d\Phi_{1_{tot}}/dt + r_1 i_1 \\ u_2 = e'_2 - r_2 i_2 = -n_2 d\Phi_{2_{tot}}/dt - r_2 i_2 \end{cases}$$

$$\begin{cases} u_1 = n_1 d\Phi / dt + \ell_1 di_1/dt + r_1 i_1 = e_1 + \ell_1 di_1/dt + r_1 i_1 \\ u_2 = -n_2 d\Phi / dt - \ell_2 di_2/dt - r_2 i_2 = e_2 - \ell_2 di_2/dt - r_2 i_2 \end{cases}$$

avec

$$\begin{cases} e_1 = n_1 d\Phi/dt \\ e_2 = -n_2 d\Phi/dt \end{cases}$$

En écriture complexe :

$$\begin{cases} \underline{U}_1 = \underline{E}_1 + j \ell_1 \omega \underline{I}_1 + r_1 \underline{I}_1 \\ \underline{U}_2 = \underline{E}_2 - j \ell_2 \omega \underline{I}_2 - r_2 \underline{I}_2 \end{cases} \quad \text{avec} \quad \begin{cases} \underline{E}_1 = j n_1 \omega \underline{\Phi} \\ \underline{E}_2 = j n_2 \omega \underline{\Phi} \end{cases}$$



## IV- Fonctionnement en charge

### L'équation des f.m.m

En charge  $n_1 \underline{i}_1 + n_2 \underline{i}_2 = \mathfrak{R} \cdot \underline{\Phi}$

A vide  $n_1 \underline{i}_{10} = \mathfrak{R} \underline{\Phi}_{10}$

Le transformateur est considéré comme une machine à flux imposé par la tension d'alimentation. Comme cette tension est pratiquement la même à vide et en charge.

donc  $\underline{\Phi}_{10} \approx \underline{\Phi}$

Donc  $n_1 \underline{i}_1 + n_2 \underline{i}_2 = n_1 \underline{i}_{10}$

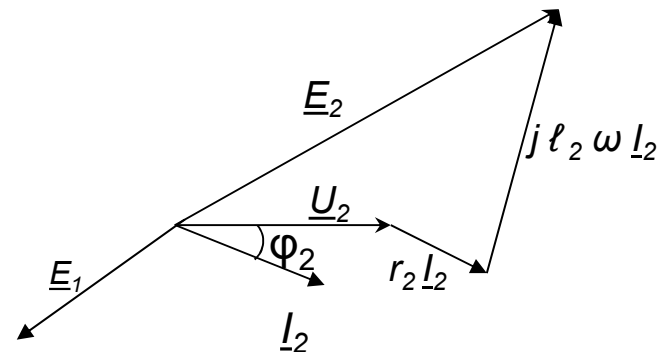
# IV- Fonctionnement en charge

## Diagramme vectoriel

On suppose connu le régime du secondaire caractérisé par  $U_2$ ,  $I_2$ ,  $\varphi_2$

$$\underline{U}_2, \underline{I}_2, \varphi_2 \rightarrow \underline{E}_2 = \underline{U}_2 + r_2 \underline{I}_2 + j \ell_2 \omega \underline{I}_2$$

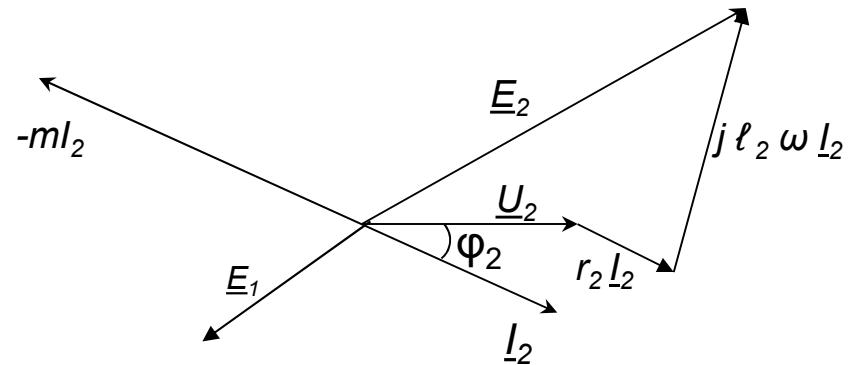
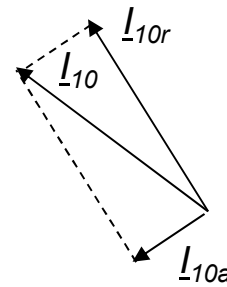
$$\rightarrow \underline{E}_1 \text{ tel que } \underline{E}_2 = -m \underline{E}_1$$



# IV- Fonctionnement en charge

## Diagramme vectoriel

$$\begin{aligned} \underline{I}_{10a} \text{ et } \underline{I}_{10r} &\rightarrow \underline{I}_{10} = \underline{I}_{10a} + \underline{I}_{10r} \\ &\rightarrow \underline{I}_1 = \underline{I}_{10} - m \underline{I}_2 ; \end{aligned}$$

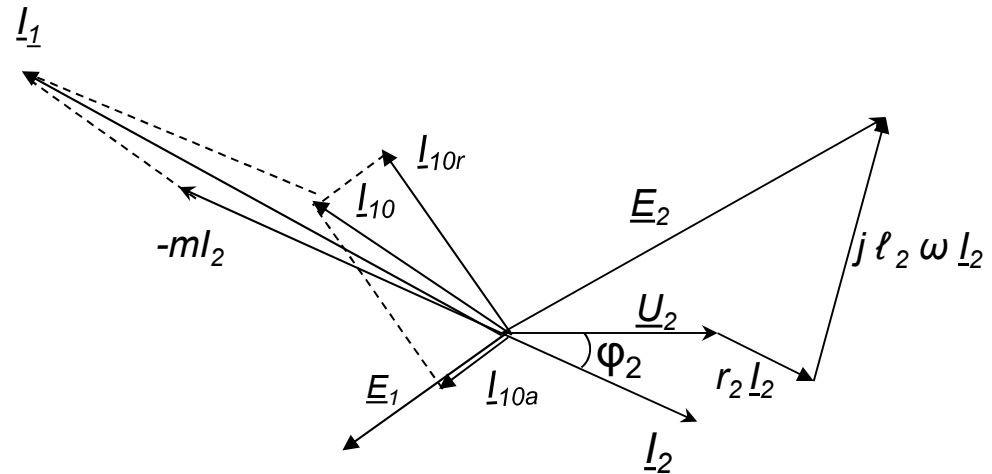


# IV- Fonctionnement en charge

## Diagramme vectoriel

$$\underline{I}_{10a} \text{ et } \underline{I}_{10r} \rightarrow \underline{I}_{10} = \underline{I}_{10a} + \underline{I}_{10r}$$

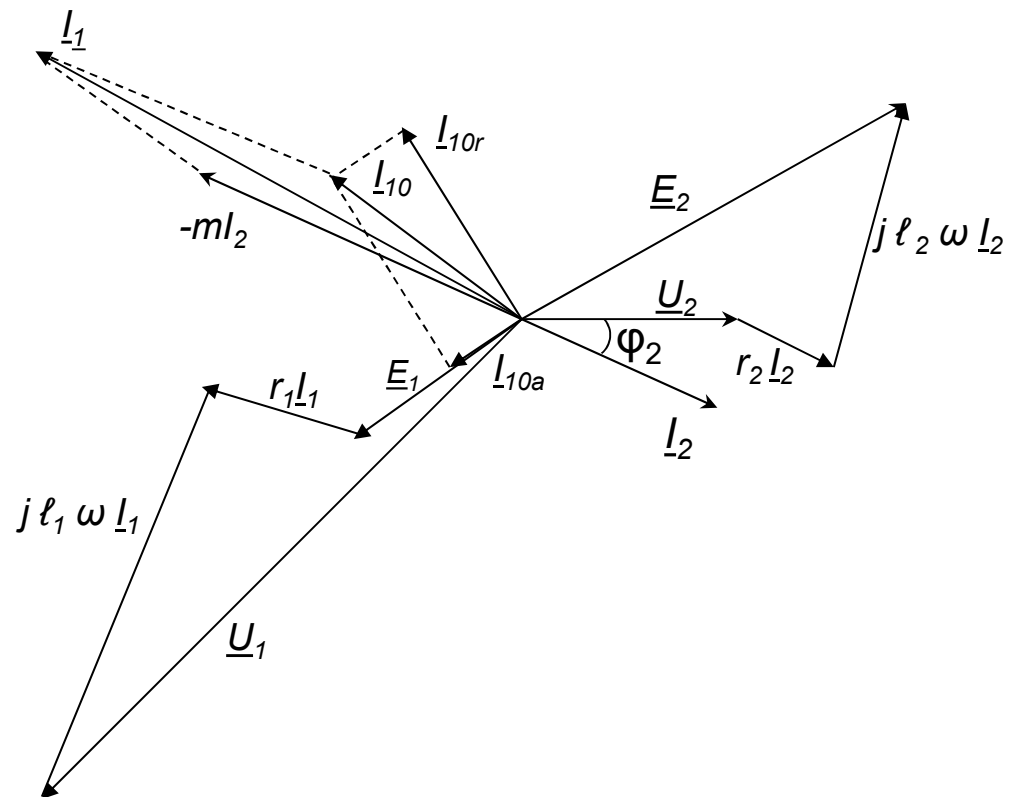
$$\rightarrow \underline{I}_1 = \underline{I}_{10} - m \underline{I}_2 ;$$



# IV- Fonctionnement en charge

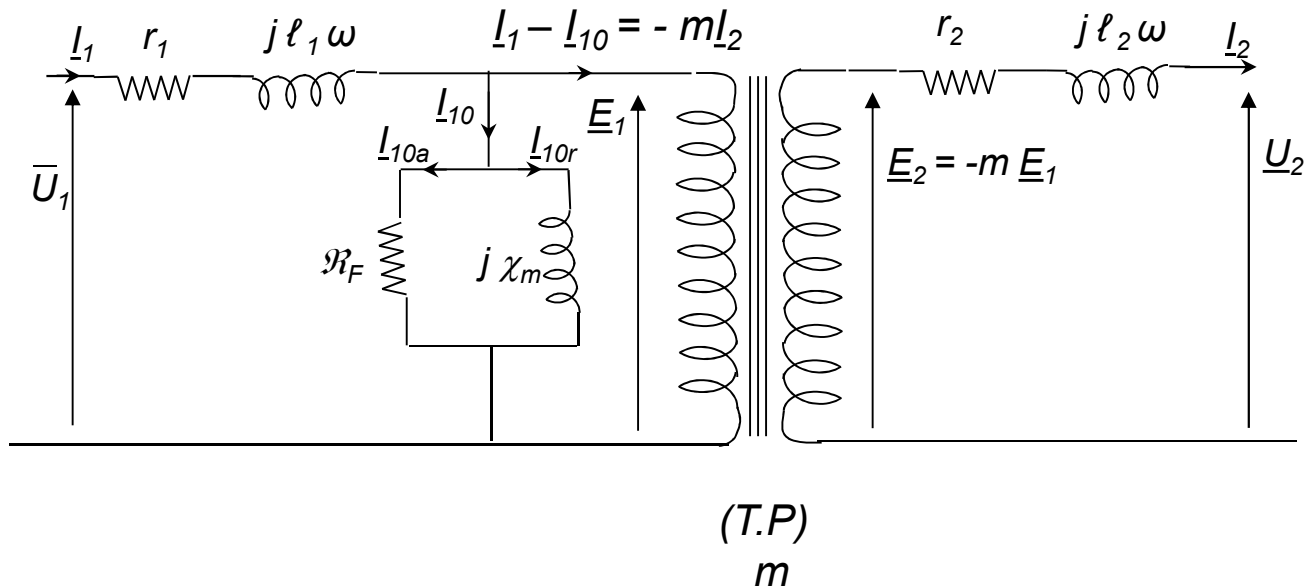
## Diagramme vectoriel

$$\rightarrow \underline{U}_1 = \underline{E}_1 + r_1 \underline{I}_1 + j \ell_1 \omega \underline{I}_1$$



# IV- Fonctionnement en charge

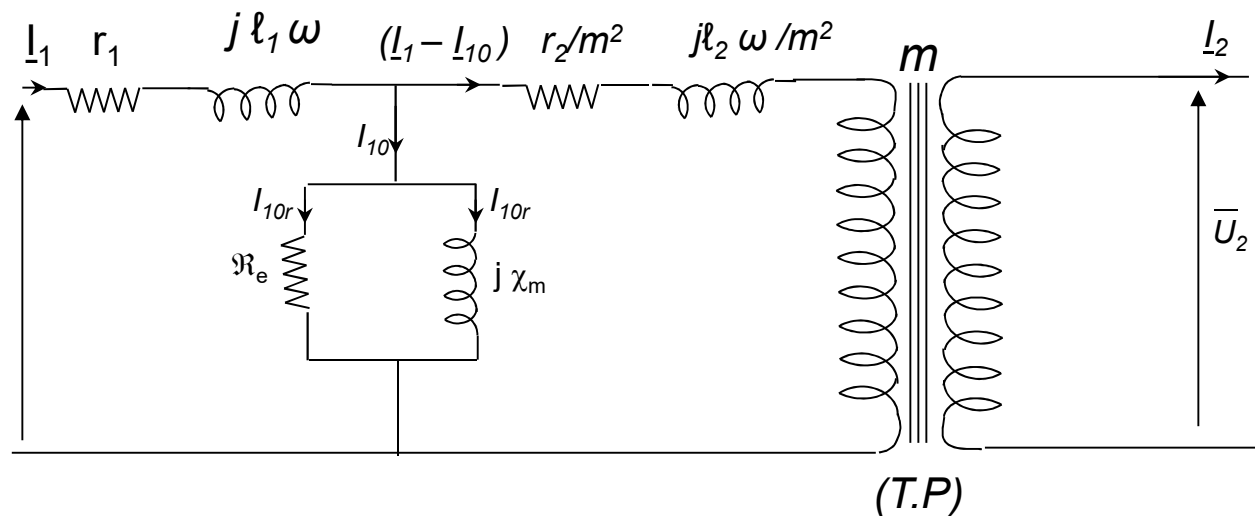
Schéma équivalent:



# IV- Fonctionnement en charge

Schéma équivalent ramené au primaire:

$$\left\{ \begin{array}{l} \underline{U}_1 = \underline{E}_1 + r_1 \underline{I}_1 + j \ell_1 \omega \underline{I}_1 \\ \underline{U}_2 = \underline{E}_2 - r_2 \underline{I}_2 - j \ell_2 \omega \underline{I}_2 \\ \underline{E}_2 = -m \underline{E}_1 \\ \underline{I}_1 + m \underline{I}_2 = \underline{I}_{10} \end{array} \right.$$



## IV- Fonctionnement en charge

$$\begin{aligned}
 \underline{U}_1 &= (-1/m)\underline{E}_2 + r_1 \underline{I}_1 + j \ell_1 \omega \underline{I}_1 \\
 &= (-\underline{U}_2 / m) - (1/m)(r_2 + j \ell_2 \omega) \cdot (1/m)(\underline{I}_{10} - \underline{I}_1) + (r_1 + j \ell_1 \omega) \underline{I}_1 \\
 \underline{U}_1 &= (-\underline{U}_2 / m) + (1/m^2)(r_2 + j \ell_2 \omega)(\underline{I}_1 - \underline{I}_{10}) + (r_1 + j \ell_1 \omega) \underline{I}_1
 \end{aligned}$$

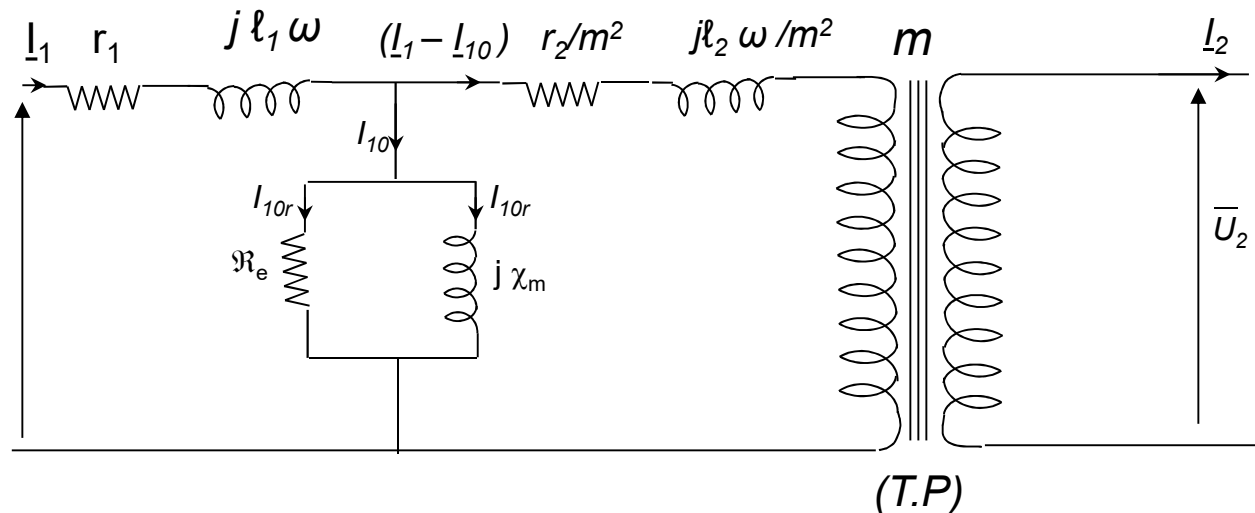


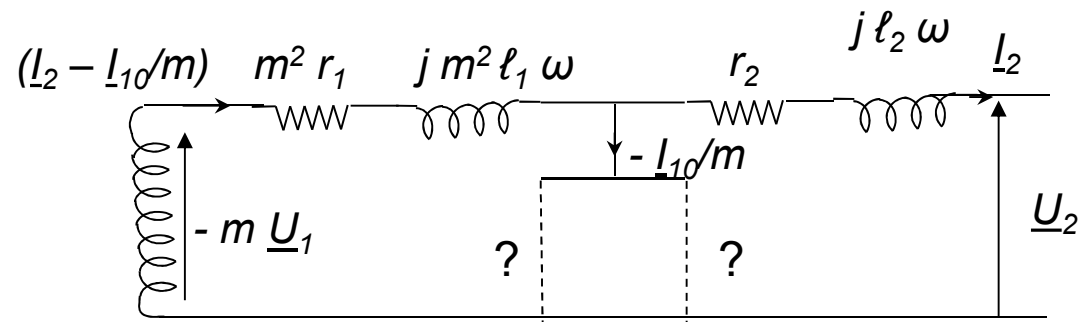
Schéma équivalent du transformateur ramené au primaire



# IV- Fonctionnement en charge

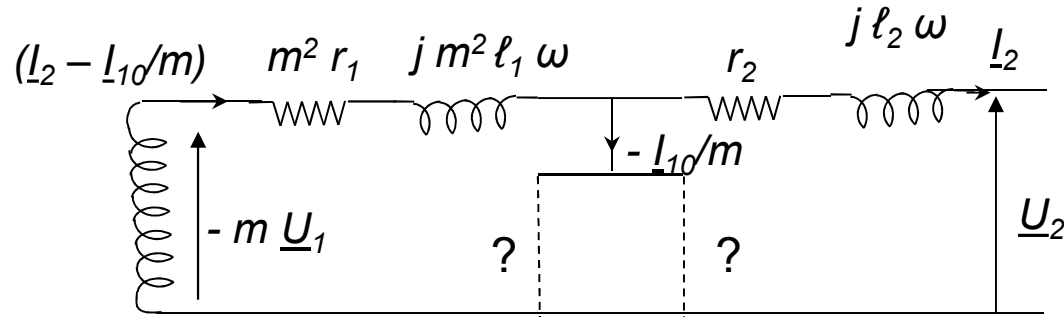
Schéma équivalent ramené au secondaire:

$$\left\{ \begin{array}{l} \underline{U}_1 = \underline{E}_1 + r_1 \underline{I}_1 + j \ell_1 \omega \underline{I}_1 \\ \underline{U}_2 = \underline{E}_2 - r_2 \underline{I}_2 - j \ell_2 \omega \underline{I}_2 \\ \underline{E}_2 = -m \underline{E}_1 \\ \underline{I}_1 + m \underline{I}_2 = \underline{I}_{10} \end{array} \right.$$



## IV- Fonctionnement en charge

$$\left\{ \begin{array}{l} \underline{U}_2 = -m \underline{E}_1 - (r_2 + j \ell_2 \omega) \underline{I}_2 \\ \underline{U}_2 = -m \underline{U}_1 + m(r_1 + j \ell_1 \omega) (\underline{I}_{10} - m \underline{I}_2) - (r_2 + j \ell_2 \omega) \underline{I}_2 \\ \underline{U}_2 = -m \underline{U}_1 - m^2 (r_1 + j \ell_1 \omega) (\underline{I}_2 - (1/m) \underline{I}_{10}) - (r_2 + j \ell_2 \omega) \underline{I}_2 \end{array} \right.$$



## IV- Fonctionnement en charge

$$\underline{E}_1 = ( \mathfrak{R}_F // j \chi_m ) \underline{I}_{10}$$

$$-\underline{E}_2 / m = ( \mathfrak{R}_F // j \chi_m ) \underline{I}_{10}$$

$$(\underline{U}_2 + (r_2 + j \ell_2 \omega) \underline{I}_2) = - m ( \mathfrak{R}_F // j \chi_m ) \underline{I}_{10}$$

$$\underline{U}_2 = - m ( \mathfrak{R}_F // j \chi_m ) \underline{I}_{10} - (r_2 + j \ell_2 \omega) \underline{I}_2 = m^2 ( \mathfrak{R}_F // j \chi_m ) - \underline{I}_{10} / m - (r_2 + j \ell_2 \omega) \underline{I}_2$$

$$m^2 [ \mathfrak{R}_F // j \chi_m ] = m^2 \mathfrak{R}_F (j \chi_m) / ( \mathfrak{R}_F + j \chi_m ) = (m^2 \mathfrak{R}_F \cdot j m^2 \chi_m) / ( m^2 \mathfrak{R}_F + j m^2 \chi_m )$$

$$= ( m^2 \mathfrak{R}_F ) // ( j m^2 \chi_m )$$

## IV- Fonctionnement en charge

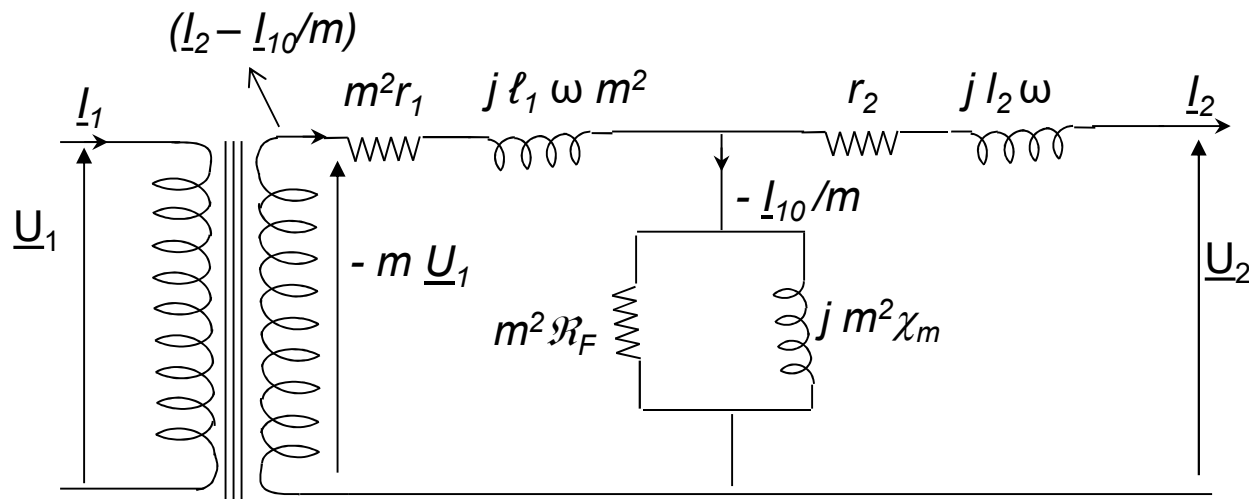


Schéma équivalent du transformateur ramené au secondaire

# V- Etude du transformateur dans l'approximation de Kapp

## 1- Equation – Diagramme vectoriel – schéma équivalent

L'hypothèse de Kapp consiste à négliger le courant primaire à vide devant le courant primaire en charge ( $I_{10} \ll I_1$ ). Cette hypothèse est d'autant plus justifiée qu'on est proche du régime nominal.

L'équation des A.t se réduit à  $n_1 \underline{I}_1 + n_2 \underline{I}_2 = 0$  ou  $\underline{I}_1 = -m \underline{I}_2$

### - Equations:

$$\left\{ \begin{array}{l} \underline{U}_1 = \underline{E}_1 + (r_1 + j x_1) \underline{I}_1 \\ \underline{U}_2 = \underline{E}_2 + (r_2 + j x_2) \underline{I}_2 \\ \underline{E}_2 = -m \underline{E}_1 \\ \underline{I}_1 = -m \underline{I}_2 \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} (x_1 = \ell_1 \omega) \\ (x_2 = \ell_2 \omega) \end{array}$$

# V- Etude du transformateur dans l'approximation de Kapp

$$\underline{U}_2 = - m \underline{U}_1 - [ (r_2 + m^2 r_1) + j(x_2 + m^2 x_1)] \underline{I}_2$$

Ramenée au secondaire

$$r_2 + m^2 r_1 = r_{t2} \quad (\text{résistance totale})$$

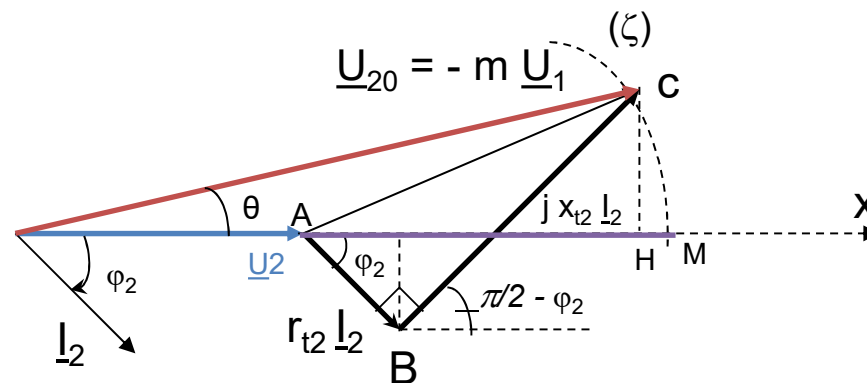
$$x_2 + m^2 x_1 = x_{t2} \quad (\text{réactance totale})$$

$$- m \underline{U}_1 = \underline{U}_{20} = \underline{U}_2 + (r_{t2} + jx_{t2}) \underline{I}_2$$

# V- Etude du transformateur dans l'approximation de Kapp

## Diagramme vectoriel:

Cas d'une charge inductive:



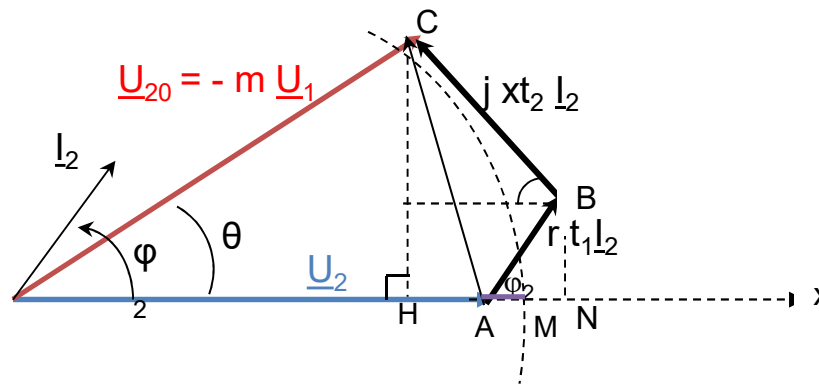
— AM : chute de tension

$$\Delta U_2 = U_{20} - U_2 = AM.$$

M étant le point d'intersection du cercle (  $\zeta$  ) de centre O et de rayon OC avec l'axe Ox.

# V- Etude du transformateur dans l'approximation de Kapp

Cas d'une charge capacitive:



— AM : chute de tension

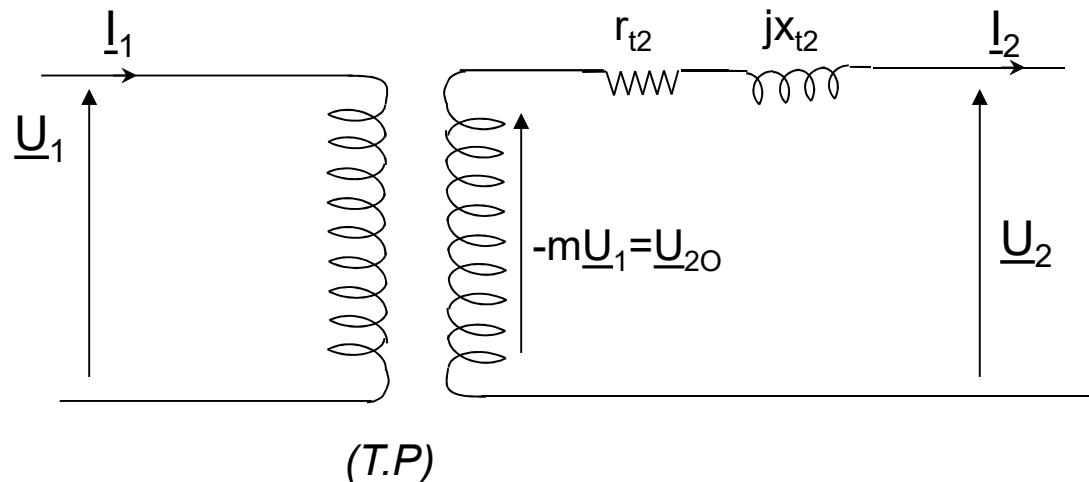
$$\Delta U_2 = U_{20} - U_2 = AM.$$

M étant le point d'intersection du cercle (  $\zeta$  ) de centre O et de rayon OC avec l'axe Ox.14



# V- Etude du transformateur dans l'approximation de Kapp

Schéma équivalent ramené au secondaire:



$\underline{U}_{20}$  est la tension secondaire à vide

# V- Etude du transformateur dans l'approximation de Kapp

## 2- Etude de la chute de tension

Par définition la chute de tension dans un transformateur est la différence des tensions secondaires à vide et en charge :

$$\Delta U_2 = U_{20} - U_2 = AM.$$

M étant le point d'intersection du cercle (  $\zeta$  ) de centre O et de rayon OC avec l'axe Ox.

Pour un transformateur de bonne qualité, le triangle de Kapp (ABC) est de petites dimensions ( les chutes de tension résistive  $r_{t2} I_2$  et inductive  $x_{t2} I_2$  sont faibles devant  $U_2$  et  $U_{20}$ ) et on peut confondre le point M avec le point H projection de C sur l'axe Ox.

## V- Etude du transformateur dans l'approximation de Kapp

$$U_{20} \cos\theta \approx U_{20} = U_2 + (r_{t2} \cos\varphi_2 \pm x_{t2} \sin\varphi_2) I_2$$

$$\Delta U_2 = (r_{t2} \cos\varphi_2 \pm x_{t2} \sin\varphi_2) I_2$$

$\varphi_2$  : déphasage entre le courant  $I_2$  et tension  $U_2$

+ : pour une charge inductive

- : pour une charge capacitive

Si la charge est résistive  $\varphi_2 = 0$        $\Delta U_2 = r_{t2} I_2$

# V- Etude du transformateur dans l'approximation de Kapp

## 3- Etude du rendement

Par définition :

$$\begin{aligned}\eta &= P_2 / P_1 = P_2 / (P_2 + P_{fer} + P_{cu}) \\ &= U_2 I_2 \cos\varphi_2 / (U_2 I_2 \cos\varphi_2 + P_{fer} + P_{cu})\end{aligned}$$

$$P_{fer} \approx \frac{U_1^2}{R_f} \quad \text{et} \quad P_{cu} = r_1 I_1^2 + r_2 I_2^2 = r_{t2} I_2^2$$

$$\eta = U_2 I_2 \cos\varphi_2 / (U_2 I_2 \cos\varphi_2 + P_{fer} + r_{t2} I_2^2)$$

$$\eta = U_2 \cos\varphi_2 / (U_2 \cos\varphi_2 + P_{fer}/I_2 + r_{t2} I_2)$$

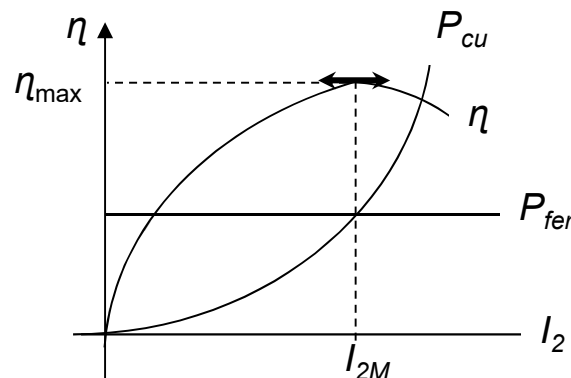
# V- Etude du transformateur dans l'approximation de Kapp

$$\eta = U_2 \cos\varphi_2 / (U_2 \cos\varphi_2 + P_{\text{fer}}/I_2 + r_{t2} I_2)$$

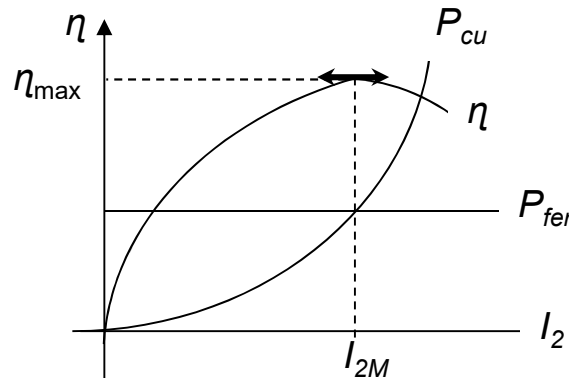
Si l'on suppose  $U_2$  et  $\cos\varphi_2$  constants :

$\eta$  passe par son maximum pour  $I_2 = I_{2M}$  qui rend minimale la quantité

$$(P_{\text{fer}} / I_2 + r_{t2} I_2),$$



## V- Etude du transformateur dans l'approximation de Kapp



soit  $I_{2M} = \sqrt{(P_{\text{fer}} / r_{t2})}$  ou  $I_2$  tel que  $P_{\text{fer}} = r_{t2} I_2^2$  càd  $P_{\text{fer}} = P_{\text{cu}}$ .

La valeur maximale du rendement est :

$$\eta_{\max} = U_2 I_{2M} \cos\varphi_2 / (U_2 I_{2M} \cos\varphi_2 + 2P_{\text{fer}})$$

- Le rendement est d'autant plus élevé que  $\cos\varphi_2$  tend vers 1.
- Le rendement est d'autant plus élevé que la puissance apparente est plus importante.

## **VII- Détermination pratique des caractéristiques en charge d'un transformateur**

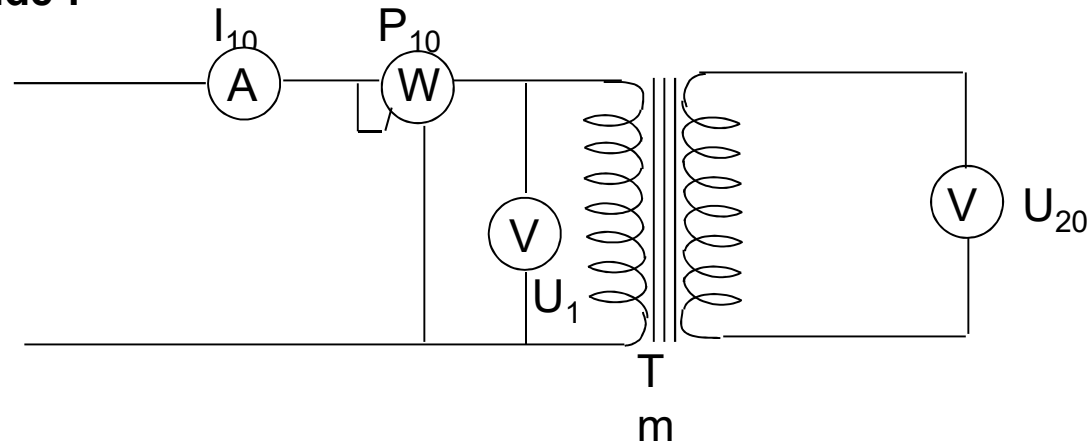
Afin de déterminer ou vérifier expérimentalement les caractéristiques en charge d'un transformateur, on peut procéder de deux façons différentes :

soit directement à partir d'essais en charge méthode lourde et coûteuse,  
ou indirectement à partir d'essais à puissance utile nulle, méthode généralement adoptée.

Elle consiste à faire deux essais : un essai à vide et un essai en court circuit.

## VII- Détermination pratique des caractéristiques en charge d'un transformateur

### 1- Essai à vide :



- $I_{10}$  est faible ( 1 à 5% de  $I_1$  nominal ).
- Le rapport de transformation est

$$m = U_{20} / U_1$$

$$P_{10} = P_{\text{fer}} + r_1 I_{10}^2 \approx P_{\text{fer}}$$

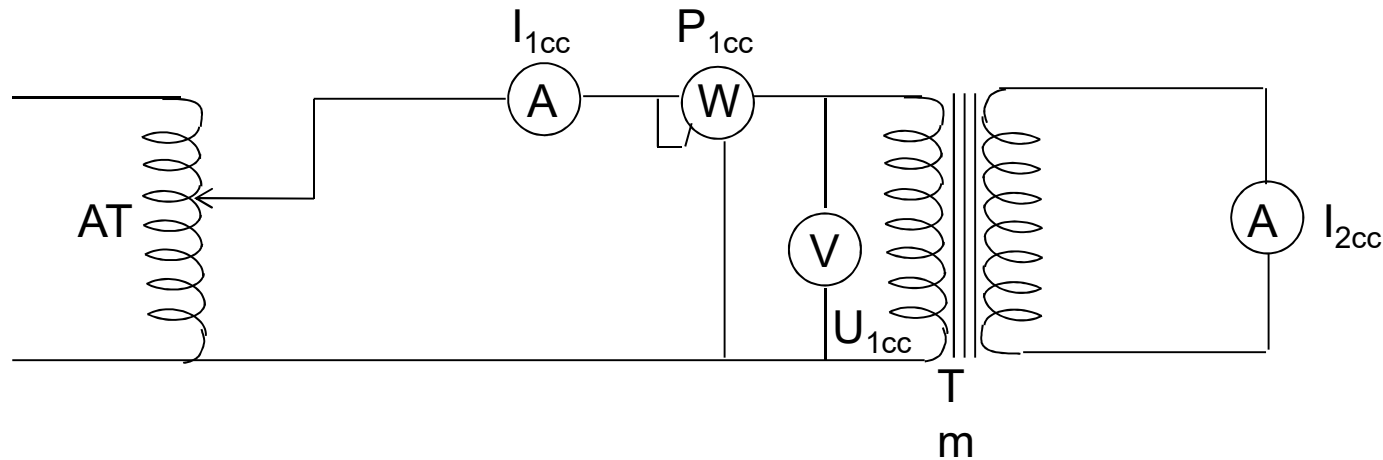
→

$$R_F = U_1 / (I_{10} \cos \varphi_{10}) \quad \text{et} \quad X_m = U_1 / (I_{10} \sin \varphi_{10})$$



# VII- Détermination pratique des caractéristiques en charge d'un transformateur

## 2- Essai en c.c.



A l'aide de l'autotransformateur (AT), on alimente le transformateur à tension réduite  $U_{1cc}$  jusqu'à  $I_{2cc} = I_{2n}$ .

si c'est possible ( essai en cc normalisé).

Pour un essai normalisé (  $U_{1cc} = 1$  à 5% de  $U_{1n}$  ).

## VII- Détermination pratique des caractéristiques en charge d'un transformateur

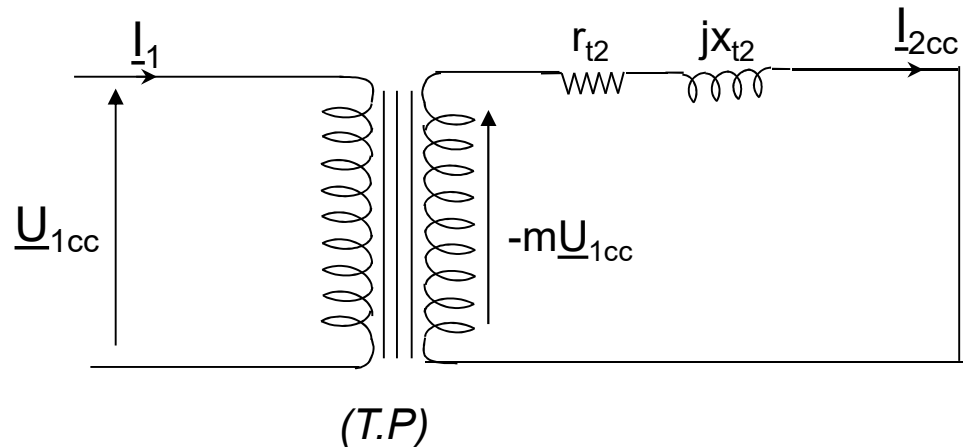
Les pertes fer variant comme le carrée de la tension primaire sont donc négligeables et

$$P_{1cc} \approx r_{t2} I_{2cc}^2 \rightarrow r_{t2} = P_{1cc} / I_{2cc}^2$$

En cc, le schéma équivalent devient :

$$-m \underline{U}_{1cc} = (r_{t2} + jx_{t2}) \underline{I}_{2cc}$$

$$x_{t2} = \sqrt{m^2 U_{1cc}^2 / (I_{2cc}^2) - r_{t2}^2}$$



## VII- Détermination pratique des caractéristiques en charge d'un transformateur

A partir des résultats de ces 2 essais on peut prédéterminer les caractéristiques en charge du transformateur

$\Delta U_2$  et  $\eta$  en fonction de  $I_2$  .

$$\Delta U_2 = ( r t_2 \cos \varphi_2 \pm x_{t2} \sin \varphi_2 ) I_2$$

$$\eta = U_2 I_2 \cos \varphi_2 / ( U_2 I_2 \cos \varphi_2 + P_{fer} + r t_2 I_2^2 )$$

# VIII- Utilisation et réalisation des transformateurs monophasés

## 1- Utilisation

- Les transformateurs monophasés ne dépassant pas quelques KVA sont généralement utilisés :
  - Pour l'obtention de très basses tensions de sécurité (  $< 24\text{ V}$  ) qu'on utilise pour alimenter les circuits mal isolés, les locaux humides, les jouets, .....
  - Pour la production des B.T nécessaires pour les circuits électroniques à transistors et des H.T pour les dispositifs qui comportent des tubes cathodiques ;
  - Pour l'isolation d'appareils ou de portions de réseaux ;
  - Pour la production de forts courants sous faible tension grâce à un rapport de transformation très petit ( transformateurs pour poste de soudure, four à induction, ...)

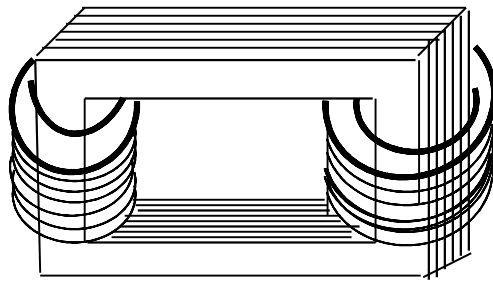
# VIII- Utilisation et réalisation des transformateurs monophasés

## 2- Grandeurs nominales

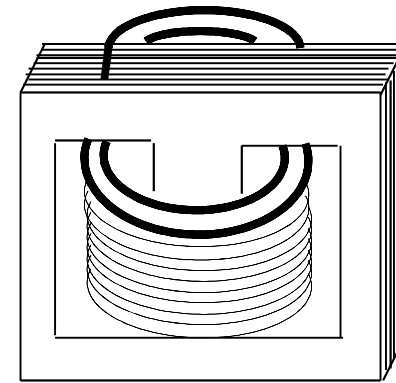
- sont les valeurs données par le constructeur au delà des quelles le bon fonctionnement n'est plus garanti.
- La plaque signalétique d'un transformateur indique les valeurs nominales de la tension primaire  $U_{1n}$ , de la tension secondaire  $U_{2n}$ , de la puissance apparente secondaire  $S_{2n}$  ou du courant secondaire  $I_{2n}$  ( $S_{2n} = U_{2n} I_{2n}$ ).
- $U_{2n} / U_{1n} = m_n < m = U_{20}/U_{1n}$  à cause de la chute de tension en charge.

# VIII- Utilisation et réalisation des transformateurs monophasés

## 4- Réalisation



*Circuit magnétique  
à 2 noyaux*



*Circuit magnétique cuiracé*

## VIII- Utilisation et réalisation des transformateurs monophasés

On distingue 2 types de circuits magnétiques :

- Circuits magnétique à 2 noyaux : chaque noyau porte la moitié de l'enroulement B.T et la moitié de l'enroulement HT pour obtenir un meilleur mélange de flux.
- Circuit magnétique cuiracé : le noyau central porte les 2 enroulements. B.T et H. T La colonne centrale a une épaisseur double de celle des 2 autres colonnes pour obtenir une induction constante dans tout le circuit magnétique (le flux se répartit symétriquement à droite et à gauche et il est double dans la partie centrale).

## VIII- Utilisation et réalisation des transformateurs monophasés

- Les noyaux sont formés d'empilement de tôles siliciées, minces et isolées pour réduire les pertes fer.
- Les spires des enroulements sont jointives, serrées et isolées entre elles.
- L'enroulement B.T se trouve toujours du côté du noyau pour assurer une bonne isolation de l'enroulement H.T par rapport à la carcasse de circuit magnétique.