

TRANSFORMATEUR MONOPHASE

1. Présentation:

Un **transformateur** est une machine **statique** permettant de modifier un **système de tension** et de **courant alternatif** en un **système de tension** et de **courant** toujours **alternatif** de valeurs différentes mais de **même fréquence**. En d'autres termes, il permet d'élever (ou d'abaisser) la tension tout en abaissant (ou élevant) l'intensité avec un excellent rendement.

Le **transport** de l'énergie électrique à **longue distance** impose l'utilisation de tensions élevées (**MT, HT** ou **THT**) afin de limiter les pertes joule (Ri^2) en ligne et son usage **domestique** pour des raisons de sécurité n'est possible qu'en **BT**. Le transformateur sert aussi à abaisser la tension **BT** (220V) jusqu'à obtenir la valeur recherchée en **TBT** pour construire une alimentation à courant continue nécessaire pour tout appareil transistorisé (ampli, ordinateur, radio, télé, magnétoscope, etc.) consommant trop de puissance pour être alimenté par des piles électriques.

1.1. Constitution :

Un transformateur monophasé est constitué d'un **circuit magnétique** et de **deux enroulements** (bobines) électriquement indépendants.

1.1.1. Le circuit magnétique :

Il est formé de **deux (2)** ou **trois (3)** noyaux et **deux (2)** culasses. Traversé par un **flux magnétique** variable, il est le siège de **pertes magnétiques** ; **pertes par courant de Foucault** qu'on limite en feuilletant le circuit, **pertes par hystérésis** qu'on diminue en utilisant de l'acier au silicium à cristaux orientés.

1.1.2. Les enroulements :

Ils sont disposés de manière à limiter les fuites magnétiques entre le **primaire** et le **secondaire** :

- **Le primaire** reçoit de la puissance d'une source alternative et fonctionne en **récepteur**. Les grandeurs le concernant seront affectées de l'indice **1**.
- **Le secondaire** fournit de la puissance à une charge, il fonctionne en **générateur**. Les grandeurs le concernant seront affectées de l'indice **2**.

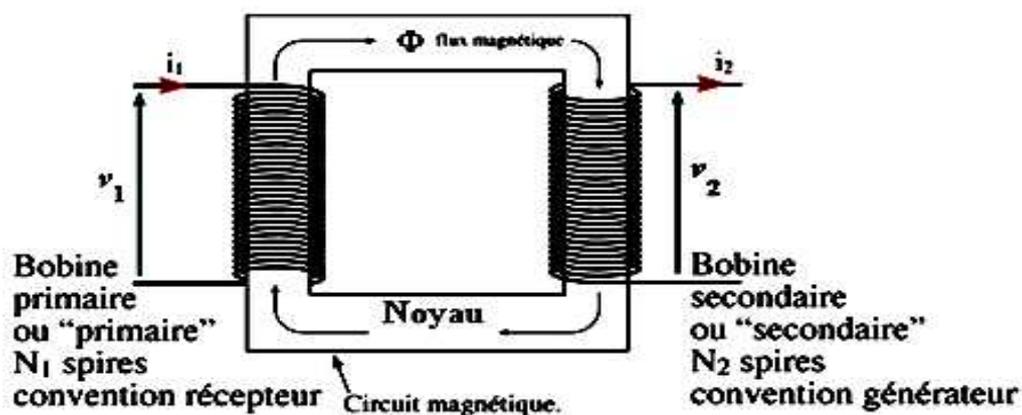


Fig. 1 : Schéma d'un transformateur monophasé

1.2. Symbole :

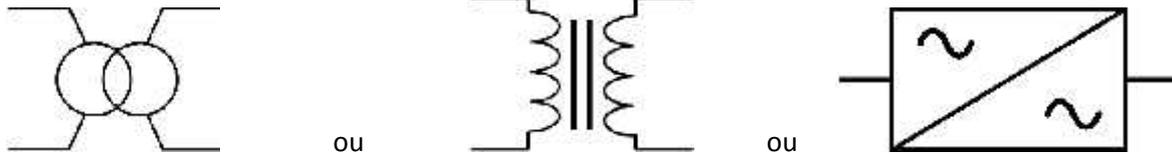
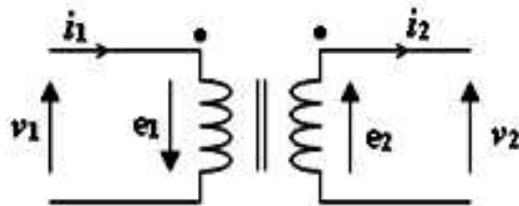


Fig.2 : Symbole du transformateur

L'enroulement **BT** est en gros fil (**grande section**) et l'enroulement **HT** est en fil fin (**petite section**)

2. Principe de fonctionnement / Formule de Boucherot:



En appliquant une tension alternative sinusoïdale entre les bornes de l'enroulement primaire, elle produit un courant alternatif sinusoïdal dans cet enroulement. Le courant primaire engendre un **flux magnétique** variable dans le circuit magnétique. Selon la loi de **Faraday** une variation de flux à travers **une spire** créer une f.é.m. **e**, tel que :

$$e = - \frac{d\Phi}{dt}$$

L'ensemble des spires est soumis à ce flux, il en résulte la création :

- dans l'enroulement primaire d'une force contre électromotrice :

$$\hat{E}_1 = N_1 2\pi f S \hat{B} \text{ d'où } E_1 = N_1 2\pi f S \hat{B} / 2$$

$$E_1 = 4.44 N_1 f S \hat{B}$$

- dans l'enroulement secondaire d'une force électromotrice:

$$\hat{E}_2 = N_2 2\pi f S \hat{B} \text{ d'où } E_2 = N_2 2\pi f S \hat{B} / 2$$

$$E_2 = 4.44 N_2 f S \hat{B}$$

C'est la formule de **Boucherot**. Cette formule montre que l'amplitude du champ magnétique dépend uniquement de la tension d'alimentation car les grandeurs (**N**, **S** et **f**) sont constantes.

N= nbr de spires ; **f**= fréquence en hertz (**Hz**) ; **S**= section en (**m²**) et **B**= induction magnétique en **Tesla (T)**.

3. Le rapport de transformation (m) :

Le rapport de transformation (**m**) est donné par le rapport des grandeurs électriques du transformateur :

$$m = \frac{V_2}{V_1} = \frac{E_2}{E_1} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{I_1}{I_2}$$

Remarque :

- Si $m < 1$ donc $U_2 < U_1$: le transformateur est dit **abaisseur**.
- Si $m > 1$ donc $U_2 > U_1$: le transformateur est dit **élevateur**.
- Si $m = 1$ donc $U_2 = U_1$: le transformateur est dit **d'isolement**.

4. Transformateur parfait :

4.1. Bilan de puissances :

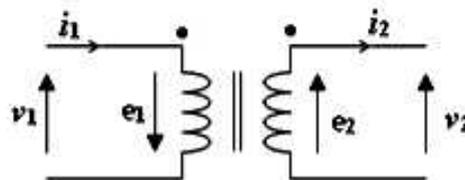


Fig. 3 Modèle équivalent transformateur parfait

Un transformateur parfait ne présente ni **pertes**, ni **fuites magnétiques** :

- **Les pertes énergétiques** d'un transformateur parfait sont **nulles** :
 - **Pertes** dans le **cuivre** ou **effet joule** nulles ($R_1 = R_2 = 0, P_j = 0$)
 - **Pertes** dans le **noyau ferromagnétique** ou **fer** ou **magnétiques nulles** ($R_f = 0, P_f = 0$). Ce qui entraîne l'égalité des puissances :

$$P_1 = P_2 \quad V_1 I_1 \cos \varphi_1 = V_2 I_2 \cos \varphi_2, \quad S_1 = S_2 \quad V_1 I_1 = V_2 I_2, \quad Q_1 = Q_2 \quad V_1 I_1 \sin \varphi_1 = V_2 I_2 \sin \varphi_2.$$

- **Les fuites magnétiques** sont nulles :

La **réductance** \mathcal{R} (capacité d'un circuit magnétique à s'opposer au courant autrement dit c'est tout ce qui s'oppose au passage du flux dans le circuit magnétique) est nulle ($\mathcal{R} = 0$), le flux à travers chaque spire du primaire est égale à celui traversant chacune des spires du secondaire. Ce qui implique l'égalité des facteurs de puissances :

$$\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi \quad \cos \varphi_1 = \cos \varphi_2 = \cos \varphi \quad \text{et} \quad \sin \varphi_1 = \sin \varphi_2 = \sin \varphi$$

Le rendement $\eta = \frac{P_2}{P_1} = 1$ est de 100%.

4.2. Transfert d'impédance :

Les **impédances** des bobines du transformateur parfait sont **nulles** ($Z_1 = Z_2 = 0$), seule la charge présente une impédance.

4.2.1. Transfert vers le secondaire :

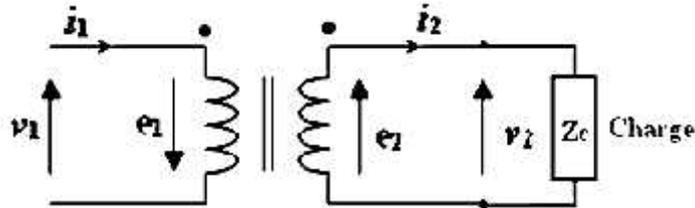


Fig. 4 : Impédance d'un transformateur parfait au secondaire

Le transformateur se comporte comme un dipôle actif qui alimente la charge sous une tension V_2 constante si V_1 est constante et de **fréquence constante**. Vu du secondaire, le transformateur se comporte comme une source de tension parfaite alimentant la charge :

$$V_2 = Z_c I_2 \quad Z_c = \frac{V_2}{I_2} \quad \boxed{Z_c = Z_s}$$

4.2.2. Transfert vers le primaire :

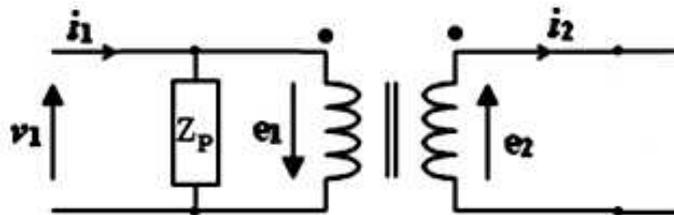


Fig. 5 : Impédance transformateur parfait au Primaire

Le transformateur se comporte, **vu du coté primaire**, comme un dipôle passif d'impédance Z_p :

$$V_1 = Z_p I_1 \Rightarrow Z_p = \frac{V_1}{I_1} \text{ avec } V_1 = \frac{V_2}{m}; I_1 = m I_2 \text{ et } Z_c = Z_s = \frac{V_2}{I_2} \text{ on a : } Z_p = \frac{\frac{V_2}{m}}{m I_2} = \frac{V_2}{I_2} \times \frac{1}{m^2} = Z_s \times \frac{1}{m^2} = \frac{Z_s}{m^2}$$

$$\boxed{Z_p = \frac{Z_c}{m^2} = \frac{Z_s}{m^2}}$$

Remarque :

- Pour transférer une impédance Z du secondaire vers le primaire du transformateur, il suffit de **diviser par m^2** l'impédance du secondaire : $Z_p = \frac{Z_s}{m^2}$
- De la même manière, pour transférer l'impédance Z du primaire vers le secondaire du transformateur, on **multiplie par m^2** l'impédance du primaire : $Z_s = Z_p m^2$.

5. Transformateur réel :

5.1. Bilan des puissances :

Dans un transformateur réel, la puissance absorbée P_1 est la puissance reçue par le **primaire** et la puissance utile P_u est la puissance P_2 disponible au **secondaire** du transformateur.

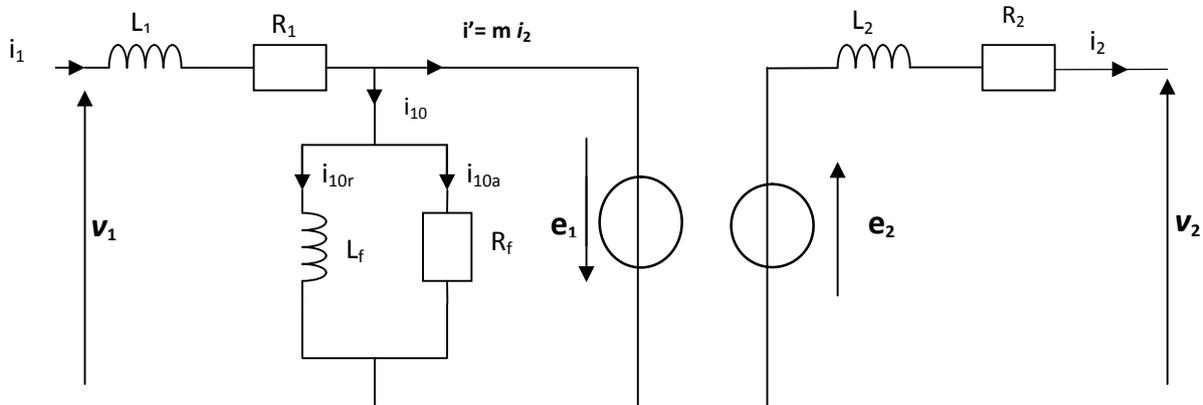


Fig. 6 : Modele équivalent d'un transformateur réel

La puissance P_1 est supérieure à la puissance P_2 . Cette différence représente l'ensemble des pertes :

- **Pertes magnétiques :** (pertes par hystérésis et pertes par courant de Foucault) ou **pertes fer**

➤ Pertes par hystérésis :

L'alimentation de la matière absorbe de l'énergie. Lors de désaimantation, l'énergie n'est que partiellement restituée. Une partie se dissipe sous forme de **chaleur** dans ce matériau : ce sont les **pertes par hystérésis**.

Elles sont proportionnelles à l'aire du cycle d'hystérésis.

➤ Pertes par courants de Foucault :

Le courant alternatif parcourant la bobine engendre un flux alternatif à travers la bobine. Ce flux variable crée dans la matière des **courants induits** appelés **courants de Foucault** qui provoque son échauffement.

En conclusion, **les pertes fer** s'exprime :

$$P_{\text{Fer}} = P_H + P_F$$

- **Pertes par effet Joule :** (ou **pertes cuivre** dues aux **résistances** des enroulements)

Cela implique :

$$P_1 > P_2 \quad , \quad S_1 > S_2 \quad \text{et} \quad Q_1 > Q_2$$

Les pertes dans le fer sont déterminées par un **fonctionnement à vide** et les pertes par effet joule par un **fonctionnement en court-circuit** du transformateur.

5.2. Fonctionnement à vide :

On alimente le transformateur par un enroulement et l'autre étant ouvert c'est-à-dire charge déconnectée ($i_2=0$). Le transformateur réel à vide peut donc se modéliser par le schéma électrique ci-dessous :

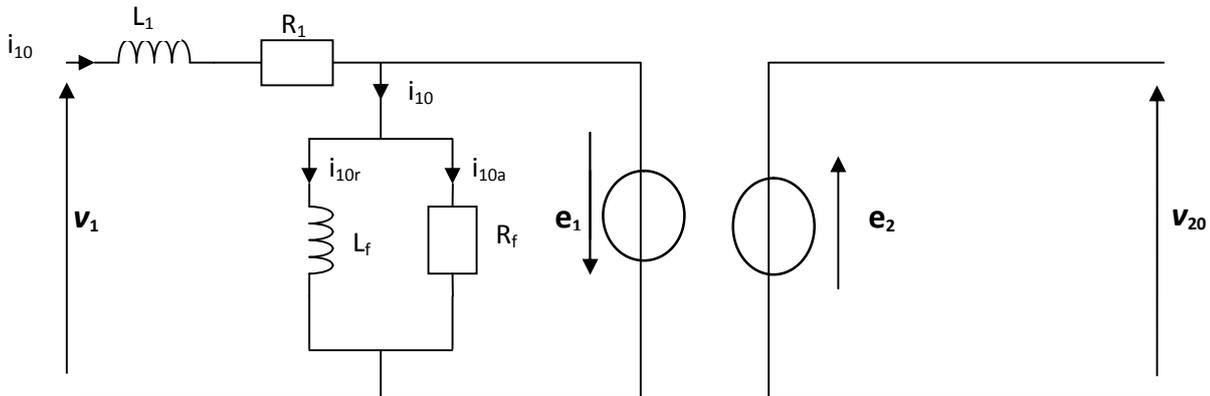


Fig. 7 : Model équivalent d'un transformateur réel à vide.

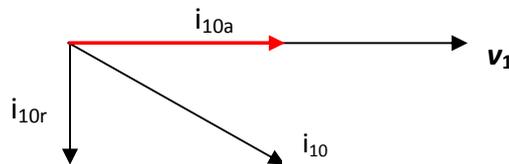


Fig.8: Diagramme Fresnel des Courants

$$P_{10} = V_1 i_{10a} = V_1 i_{10} \cos \varphi_{10}$$

$$Q_{10} = V_1 i_{10r} = V_1 i_{10} \sin \varphi_{10}$$

$$S_{10} = V_1 i_{10}$$

$$m_0 = \frac{V_{20}}{V_1} = \frac{N_2}{N_1} = m$$

Remarque:

A vide, l'influence des chutes de tension aux bornes de L_1 et R_1 sont négligées. Les pertes cuivre (Joule) dans l'enroulement primaire ($R_1 \cdot i_{10}^2$) sont négligeables par rapport aux pertes fer car le courant primaire est très petit à vide (5 à 10% de i_{1N}) : seul le noyau ferromagnétique (circuit magnétique) consomme de l'énergie.

❖ **Détermination de R_f et de L_f :**

L'intensité i_{10a} est la composante **active** de i_{10} , elle correspond à la puissance consommée par la **résistance du fer** (aux pertes fer P_f). Ces types de pertes sont constantes quelque soit la charge du transformateur :

$$P_{10} = P_f = \frac{V_1^2}{R_f} \quad R_f = \frac{V_1^2}{P_{10}} \quad \boxed{R_f = \frac{V_1^2}{P_{10}}}$$

$P_{10} = P_{fN}$ si $V_{10} = V_{1N}$ (La puissance active à vide correspond aux pertes fer)

L'intensité i_{10r} est la composante **réactive** de i_{10} , elle correspond à la puissance consommée par l'**inductance du fer** :

$$Q_{10} = \frac{V_1^2}{L_f \omega} \quad X_f = \frac{V_1^2}{Q_{10}} \quad \boxed{X_f = \frac{V_1^2}{Q_{10}}}$$

5.3. Fonctionnement en court-circuit :

Cet essai se pratique en faisant un **court-circuit** au secondaire du transformateur. Le **courant secondaire** doit être égal au **courant nominal**, pour cela il faut **diminuer** la **tension primaire**. La puissance mesurée au primaire est celle due aux **pertes cuivre (Pj)** des enroulements primaire et secondaire. Le transformateur peut être modélisé par le schéma électrique suivant :

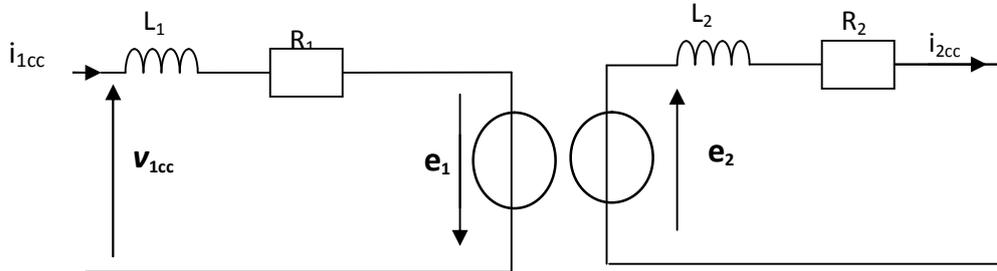


Fig. 9 : Modèle équivalent d'un transformateur réel en court-circuit.

$P_{1cc} = V_{1cc} I_{1cc} \cos \varphi_{1cc}$	$Q_{1cc} = V_{1cc} I_{1cc} \sin \varphi_{1cc}$	$m_{cc} = \frac{V_{2cc}}{V_{1cc}} = \frac{I_{1cc}}{I_{2cc}} = \frac{N_2}{N_1} = m$
--	--	--

Remarque:

Les pertes fer sont négligeables par rapport aux pertes cuivre car le courant primaire est très grand donc V_1 est très faible en court-circuit (5 à 10% de V_{1N}) : seul le bobinage ou le cuivre consomme de l'énergie.

❖ **Détermination de R_1, L_1, R_2 et L_2 :**

La **puissance active** consommée par le transformateur en **court circuit** correspond à la **puissance absorbée par le cuivre** (ou par les résistances de ses enroulements). Elle est dite **perte Joule Pj**. Ce type de pertes varie avec la charge du transformateur :

$P_{1cc} = P_j = R_1 I_{1cc}^2 + R_2 I_{2cc}^2$	$P_{1cc} = P_{jN}$ si $I_{2cc} = I_{2N}$
---	--

La **puissance réactive** consommée par le transformateur en court circuit correspond à la **puissance absorbée** par les **inductances** de ses enroulements :

$Q_{1cc} = L_1 \omega I_{1cc}^2 + L_2 \omega I_{2cc}^2$

5.3.1. Transfert d'impédance du coté primaire :

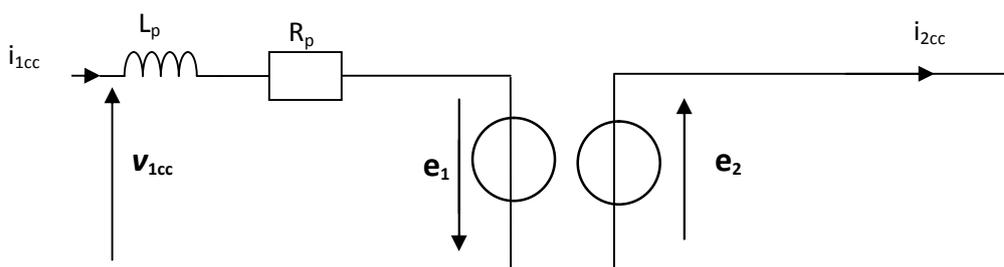


Fig. 10 : Impédance du bobinage du transformateur réel au primaire

$$V_{1cc} = Z_P I_{1cc} \text{ avec } Z_P = \sqrt{R_P^2 + (L_P)^2}$$

$$P_{1cc} = P_j = R_P I_{1cc}^2 \text{ avec } R_P = \left(R_1 + \frac{R_2}{m^2} \right)$$

En raisonnant de la même façon, pour la **puissance réactive**, on obtient :

$$Q_{1cc} = L_P I_{1cc}^2 \text{ avec } L_P = \left(L_1 + \frac{L_2}{m^2} \right)$$

5.3.2. Transfert d'impédance du coté secondaire :

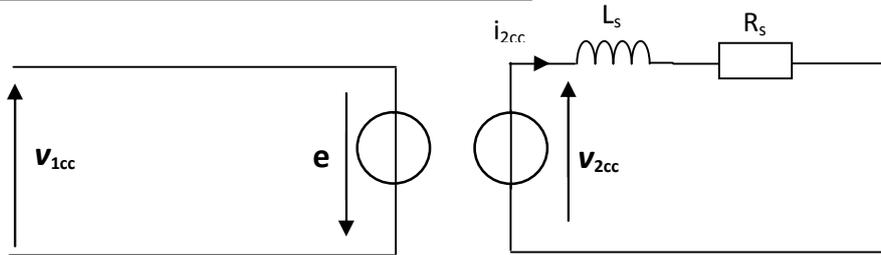


Fig. 10 : Impédance du bobinage du transformateur réel au secondaire

$$V_{2cc} = Z_S I_{2cc} \text{ avec } Z_S = \sqrt{R_S^2 + (L_S)^2}$$

$$P_{1cc} = P_j = R_S I_{2cc}^2 \text{ avec } R_S = \left(R_1 m^2 + R_2 \right)$$

En raisonnant de la même façon, pour la **puissance réactive**, on obtient :

$$Q_{1cc} = L_S I_{2cc}^2 \text{ avec } L_S = \left(L_1 m^2 + L_2 \right)$$

Remarque :

$$R_S = R_P m^2$$

$$L_S = L_P m^2$$

$$Z_S = Z_P m^2$$

5.4. Fonctionnement en charge :

On alimente le transformateur par un enroulement et l'autre débite un courant sur une **charge**. La puissance **P₁ absorbée (Pa)** est supérieure à **P₂ fournit (Pu)** à la charge. La tension **V₂** est différente de la tension à vide **V₂₀**.

$$P_1 = V_1 I_1 \cos \varphi_1$$

$$Q_1 = V_1 I_1 \sin \varphi_1$$

$$S = V_1 I_1$$

$$P_2 = V_2 I_2 \cos \varphi_2$$

$$Q_2 = V_2 I_2 \sin \varphi_2$$

$$S = V_2 I_2$$

On trouve sur la plaque signalétique d'un transformateur industriel :

- la tension primaire nominale **V_{1N}**
- la tension secondaire à vide **V₂₀**
- la puissance apparente nominale : **S_N = V_{1N} I_{1N} = V₂₀ I_{2N}**

5.4.1. Détermination du rendement :

$$\eta = \frac{P_u}{P_a}$$

❖ **Détermination directe :** on mesure P_1 et P_2

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}$$

❖ **Détermination indirecte (méthode des pertes séparées) :** on mesure P_2 , P_f et P_j :

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + P_f + P_j}$$

NB : le rendement est maximal quand $P_f = P_j$ soit pour $I_{2M} = \sqrt{\frac{P_{fer}}{R_s}}$

5.4.2. Détermination de la chute de tension :

On emploie le **modèle de Kapp** pour la détermination de la **chute de tension**.

Dans l'**approximation de Kapp** non seulement le circuit magnétique est linéaire, mais parfait. Ce qui consiste à négliger le phénomène d'**hystérésis** ainsi que le **courant de Foucault**, donc à négliger le **courant i_{10}** devant i_1 lorsque le transformateur fonctionne en **charge**. Vu du **secondaire**, le transformateur est alors équivalent à une **f.é.m. (E_s)** en série avec une **impédance (Z_s)** :

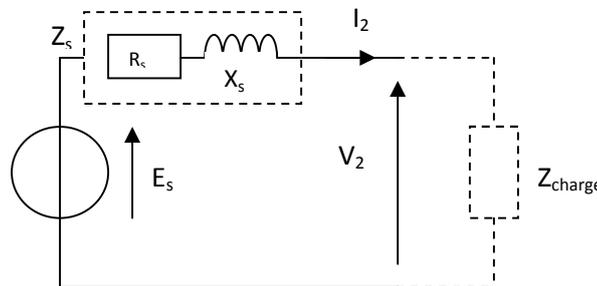


Fig. 11 : Modèle de Kapp du transformateur vu du secondaire

$E_s = mV_1 = V_{20}$	$Z_s = \sqrt{R_s^2 + (X_s)^2}$	$R_s = m^2 \times r_1 + r_2$	$X_s = (m^2 \times L_1 + L_2) \omega$
-----------------------	--------------------------------	------------------------------	---------------------------------------

❖ **Détermination des éléments du modèle de Kapp :**

Essai à vide ($i_2=0$) sous tension primaire nominale. On mesure V_1 et $V_{20} = E_s$, on en déduit :

$$m = \frac{V_{20}}{V_1}$$

Essai en court-circuit ($V_2=0$) sous tension primaire réduite pour obtenir $I_{2cc} = I_{2N}$. On mesure V_{1cc} , I_{2cc} ou I_{1cc} et P_{1cc} , on en déduit :

$$Z_s = \frac{V_{2cc}}{I_{2cc}} = \frac{mV_{1cc}}{I_{2cc}}$$

$P_{1cc} = P_j = R_s \times I_{2cc}^2$	$R_s = \frac{P_{1cc}}{I_{2cc}^2}$	et	$X_s = \sqrt{Z_s^2 - R_s^2}$
--	-----------------------------------	----	------------------------------

On peut avoir R_s par la **méthode voltampère-métrique en continu** en déterminant R_1 et R_2 puis on pose : $R_s = m^2 R_1 + R_2$ (il n'y a plus de f.é.m. induite en continu et le transformateur est équivalent à R_1 coté primaire et R_2 coté secondaire).

❖ **Exploitation du modèle de Kapp :**

Un des objectifs de la modélisation de **Kapp** du transformateur est de prédire la **chute de tension ΔV_2** en charge : $V_2 = V_{20} - \Delta V_2$

A partir du modèle, on écrit : $V_{20} = V_2 + R_s I_2 + X_s I_2$ $\vec{V}_{20} = \vec{V}_2 + \vec{V}_{RS} + \vec{V}_{XS}$ représentant l'équation vectorielle du diagramme de **Kapp**.

On construit le diagramme qui est le diagramme de **Fresnel des tensions** :

- Choisissons I_2 origine de phases, traçons un cercle de centre **O** et de rayon $E_s = mV_1 = V_{20}$.
- Traçons : $V_{RS} = R_s \cdot I_2$ avec l'angle $(I_2; \vec{V}_2) = 0$ et $V_{XS} = X_s \cdot I_2$ avec l'angle $(I_2; \vec{V}_{XS}) = \frac{\pi}{2}$.
- la droite d'action de \vec{V}_2 est donnée par le facteur de puissance de la charge : $\varphi_2 = \text{angle}(I_2; \vec{V}_2) = \varphi$ charge.
- l'extrémité de \vec{V}_2 est à l'intersection de la droite d'action et du cercle de centre **O** et de rayon V_{20} .

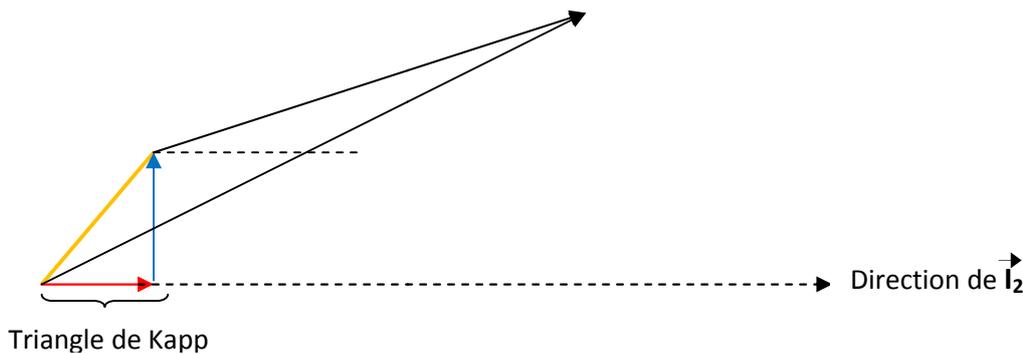
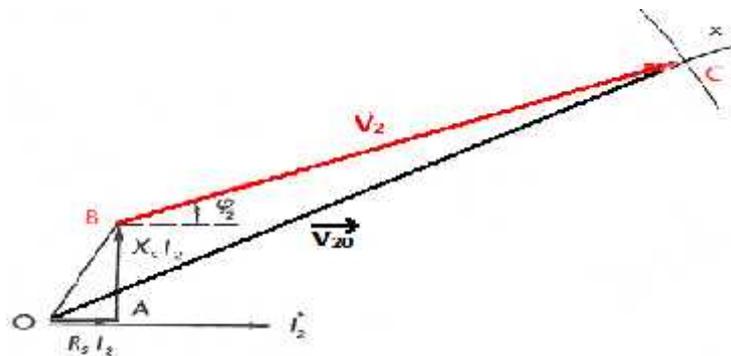


Fig. 12 : Diagramme de Kapp

On détermine ainsi graphiquement la **chute de tension absolue V_2** .

$\Delta V_2 = V_{20} - V_2$ est représentée par le segment **OB**.



$$\Delta V_2 = R_s I_2 \cos \varphi_2 + X_s I_2 \sin \varphi_2 = Z_s \cdot I_2$$

La chute de tension relative est égale à :

$$\frac{V_2}{V_{20}}$$