

LE TRANSFORMATEUR MONOPHASE

I) Généralité sur le transformateur :

1) Définition :

Le transformateur a pour but de **modifier les amplitudes des grandeurs électriques alternatives** : il **transforme des signaux sinusoïdaux** de tension et de courant de fréquence donnée en **signaux sinusoïdaux de même fréquence** mais de **valeurs efficaces différentes**.

→ Leur rendement est proche de 100%

2) Pourquoi utiliser un transformateur ?

Le transformateur est important pour le transport et la distribution de l'énergie électrique.

En effet, afin de **minimiser les pertes en ligne et notamment les pertes Joule** il faut faire diminuer le **courant** autant que possible (car $P_j = R \cdot I^2$).

Cpdt à **puissance transportée constante** si l'on diminue le courant il faut augmenter la tension car :

$$P_{elec} \propto V \cdot I$$

Par suite, le **transport du courant ne peut se faire qu'à très haute tension**, d'où la **nécessité d'un transformateur à la fois pour élever la tension dans les lignes HT et pour la baisser en BT** afin d'être utilisable par le consommateur.

3) Domaines de tension :

Dénomination :	Courant alternatif :	Courant continu :
Haute-Tension B (HTB)	$> 50 \text{ kV}$	$> 75 \text{ kV}$
Haute-Tension A (HTA)	$1000 \text{ V} - 50 \text{ kV}$	$1500 \text{ V} - 75 \text{ kV}$
Basse-Tension B (BTB)	$500 - 1000 \text{ V}$	$750 - 1500 \text{ V}$
Basse-Tension A (BTA)	$50 - 500 \text{ V}$	$120 - 750 \text{ V}$
Très Basse-Tension (TBT)	$< 50 \text{ V}$	$< 120 \text{ V}$

Attention : Ne pas se tromper sur l'appellation « Basse-Tension » = dénomination relative par rapport aux autres tensions. Car elle concerne tout de même des tensions de l'ordre de la centaine de Volt = dangereuse.

4) Constitution d'un transformateur monophasé :

Il est constitué :

- D'un **circuit magnétique fermé**
- De deux circuits électriques sans liaison entre-deux, enroulés autour du circuit magnétique :
 - **Circuit électrique lié au générateur** = **primaire**.
 - **Circuit électrique lié au récepteur** = **secondaire**.

Appelons V_1 la valeur efficace de $\underline{V}_1$ au primaire et V_2 la valeur efficace de $\underline{V}_2$ au secondaire :

- Si $V_1 < V_2$, le transformateur est dit **élévateur de tension**.
- Si $V_1 > V_2$, le transformateur est dit **abaisseur de tension**.
- Si $V_1 = V_2$, le transformateur est un **transformateur d'isolement**.

→ Voir **figure 1**

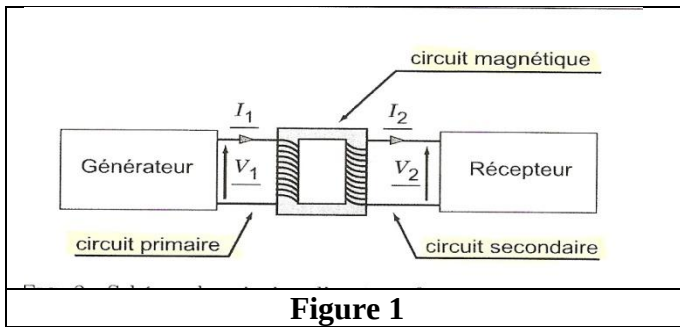


Figure 1

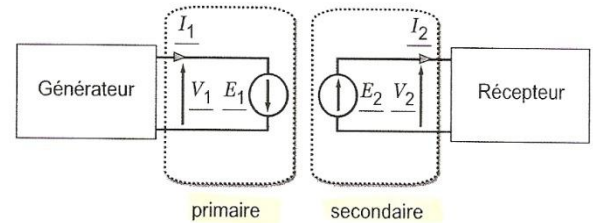


Figure 2

Attention : Il existe une **isolation galvanique** entre le **primaire** et le **secondaire** : un **défaut électrique** au **niveau du secondaire** n'est pas détectable par un **dispositif différentiel** présent au **primaire**.

Ainsi, pour **protéger l'utilisateur** d'un transformateur, il faut placer une **protection différentielle** au **secondaire**.

5) Principe de fonctionnement :

Le flux sinusoïdale créé par un courant sinusoïdale (car tension sinusoïdale) au primaire engendre une f.e.m induite $\underline{E}_1$ dans l'enroulement primaire et $\underline{E}_2$ dans l'enroulement secondaire.

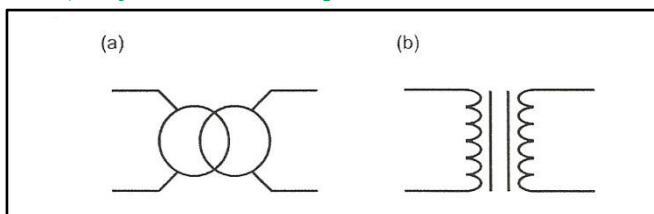
- ➔ Apparition au secondaire d'une **tension sinusoïdale de même fréquence qu'au primaire mais d'amplitude différente**.
- ➔ Voir **figure 2**
- ➔ Ce schéma permet de rendre compte des conventions de signe entre primaire et secondaire.

6) Formule de Boucherot pour le transformateur :

L'une des propriétés du **transformateur** est d'être une **machine statique à flux forcé**, car le générateur impose la tension $\underline{V}_1$ et la fréquence f . Le nombre de spire N_1 est lui fixé donc le **flux Φ voit sa valeur en module et en phase imposé** tels que : $V_1 = 4,44 \cdot N_1 \cdot f \cdot \Phi_{max}$

Donc le transformateur est une machine à flux forcé : **alimenté par une tension efficace constante**, il **fournit au secondaire une tension sinusoïdale de valeur efficace constante**.

7) Symboles électriques du transformateur :



- ➔ Usuellement nous utiliserons le schéma (a)

II) Le transformateur parfait (ou idéal) :

1) Définition :

Un transformateur parfait suit les conditions suivantes :

- **Pertes fer** : par hystérésis et courant de Foucault (= **Les Pertes actives**) sont **nulles**.
- **Le noyau est infiniment perméable au champ magnétique** et sa **réluctance $\mathcal{R}$** (= résistance au champ magn. pour un matériau) est **nulle**
- La **résistance des enroulements primaires et secondaires** est **nulle**.

- **Pertes de flux magn.** (= Les Pertes réactives) sont **nulles** : tout le flux magn. présent dans le noyau sert à magnétiser l'enroulement secondaire

Du coté des grandeurs électriques cela donne :

- Si le **secondaire est à vide** ($I_2 = 0$) alors le **courant primaire est nul** ($I_1 = 0$)
- Le **secondaire** est un **générateur parfait donc sa résistance interne est nulle** donc $V_2 = cste$ quand le **courant I_2 varie**, en valeur efficace, de **0 à sa valeur nominale I_{2n}** .
- Rendement : $\eta = 1 = 100\%$

2) Expression des f.e.m dans le transformateur parfait :

D'après la loi de Faraday, les f.e.m $\underline{E}_1$ et $\underline{E}_2$ dépendent de la variation du flux magnétique tels que :

Au primaire :	Au secondaire :
$\underline{E}_1 = -N_1 \cdot \frac{d\phi}{dt}$	$\underline{E}_2 = -N_2 \cdot \frac{d\phi}{dt}$

3) Equation de la tension dans le cas idéal :

Dans le cas idéal :

Au primaire :	Au secondaire :
$\underline{V}_1 = -\underline{E}_1 = N_1 \cdot \frac{d\phi}{dt}$	$\underline{V}_2 = \underline{E}_2 = -N_2 \cdot \frac{d\phi}{dt}$

Donc, à condition que $\frac{d\phi}{dt} \neq 0$, on peut ramener ces deux expressions :

$$\frac{\underline{V}_1}{\underline{V}_2} = -\frac{N_1}{N_2} = -m ; \text{ Avec } m : \text{ rapport de transformation } \textbf{valable en tout temps}.$$

Lorsque les valeurs temporelles sont ramenées aux valeurs efficaces : $\frac{V_2}{V_1} = m$

Attention : Si $\frac{d\phi}{dt} \neq 0$ cela implique que le **transformateur ne peut fonctionner qu'en régime alt.** car en **régime continu $I = cste$** ce qui engendre un flux magn. constant donc $\frac{d\phi}{dt} = 0$

4) Equation d'intensité :

- Dans le cas général : Relation d'Hopkinson $N_1 \cdot \underline{I}_1 + N_2 \cdot \underline{I}_2 = \mathcal{R} \cdot \Phi_m$; avec Φ_m : le flux mutuel
- Dans le **cas idéal** : $\mathcal{R} = 0$ et $\Phi = \Phi_m$

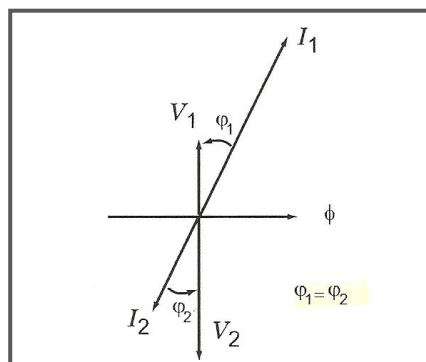
Donc $\frac{\underline{I}_1}{\underline{I}_2} = -\frac{N_1}{N_2} = \frac{1}{m} \Leftrightarrow \frac{I_1}{I_2} = \frac{1}{m}$

5) Propriétés :

a) Déphasage : Diagramme de Fresnel.

D'après les équations ci-dessus les grandeurs $\underline{V}_1$ et $\underline{V}_2$ sont alignées, et il en va de même pour les grandeurs $\underline{I}_1$ et $\underline{I}_2$:

Par conséquent, les **déphasages φ_1 et φ_2 sont les mêmes.**



b) Loi de conservation :

Toujours d'après les équations ci-dessus : $V_2 \cdot I_2 = m \cdot V_1 \times \frac{1}{m} \cdot I_1 = V_1 \cdot I_1$

Et si S_1 : puissance apparente absorbée au primaire et S_2 : puissance fournie au secondaire : $S_1 = S_2$

Puissance active : $P = S \cdot \cos(\varphi)$

Puissance réactive : $Q = S \cdot \sin(\varphi)$

Donc : $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$

Or comme S et φ sont conservées, il en va de même pour P et Q, donc : $P_1 = P_2$ et $Q_1 = Q_2$

Conclusion : Le transformateur **conserve les puissances actives, réactives et apparentes**, ainsi que le **déphasage**.

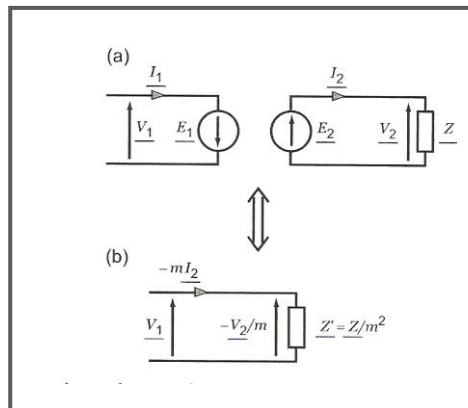
c) Adaptation d'impédance :

Soit Z : l'impédance chargée au secondaire du transformateur réel

Et Z' cette même impédance vue depuis l'entrée du transformateur c-à-d au primaire.

$$\underline{Z}' = \frac{V_1}{I_1} = \frac{\frac{V_2}{m}}{-m \cdot I_2} = \frac{V_2}{I_2} \times \frac{1}{m^2} \Leftrightarrow \underline{Z}' = \frac{\underline{Z}}{m^2}$$

Les règles de division (ou de multiplication) par m^2 pour ramener les impédances vers le primaire (ou vers le secondaire) resteront valables dans le cas d'un transformateur réel.

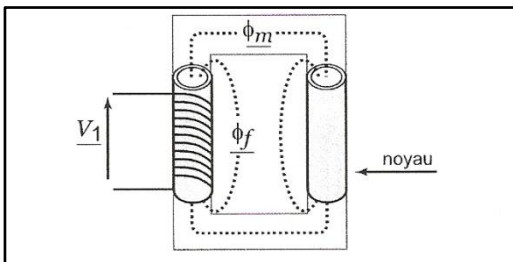


III) Le transformateur réel :

1) Les pertes dans un transformateur réel :

Dans un transformateur réel on ne néglige plus les pertes :

- **Pertes Joules** : dans les enroulements
- **Pertes fer** : phénomène hystérésis au niveau du noyau et pertes par courant de Foucault car **Réductance non-nulle**.
- **Fuite de flux magn. au niveau du noyau**.



2) Transformateur réel à vide (= circuit secondaire ouvert) :

a) Courant primaire à vide :

Pour un transformateur réel lorsque le secondaire est à vide, il y a l'apparition d'un courant très faible I_{10} au primaire, car même si le secondaire est à vide, la **magnétisation du noyau ne se fait pas sans différentes pertes** (car différent du cas idéal).

Ainsi I_{10} : **courant de magnétisation**.

- **Pertes Joules négligeables**
- **Flux de fuite négligeables** ($P\Phi_f = 0$)
- **Relation d'Hopkinson** : $\underline{I_{10}} \cdot \underline{N_1} = \mathcal{R} \cdot \underline{\Phi_m} \neq 0$

b) Tension secondaire à vide :

Soit V_{10} la tension imposée par le générateur au primaire (ne dépend donc pas des enroulements)

Et V_{20} la tension mesurée au secondaire correspondant à sa **valeur maximale puisque pas de chute de tension (car le courant est nulle)**.

Donc : $\frac{V_{20}}{V_{10}} = m$

c) Circuit équivalent à vide :

Notons l_m : la perte de puissance réactive sous forme d'une inductance et R_f : les pertes fer (ou pertes de puissances actives) sous forme de résistance :

Circuit équivalent du transformateur réel à vide :	Diagramme de Fresnel :

Puisque à vide $P_f = 0$ et $(P\Phi_f = 0)$, étudions les pertes fer (Hystérésis et courant de Foucault).

Pertes fer : $P_{fer} = V_1 \cdot I_{1a0} = R_f \cdot (I_{1a0})^2$

3) Transformateur réel en charge (= en utilisation normale) :

a) Circuit équivalent du transformateur en charge :

Dans ces conditions de fonctionnement, le courant I_1 est suffisamment élevé pour que les pertes de flux par fuite et les pertes Joule ne soient plus négligées :

b) Equations des tensions :

Au primaire :	Au secondaire :
$\underline{V_1} = (r_1 + j \cdot l_1 \cdot \omega) \cdot \underline{I_1} - \underline{E_1}$	$\underline{V_2} = (r_2 + j \cdot l_2 \cdot \omega) \cdot \underline{I_2} - \underline{E_2}$
Avec $\underline{E_1} = -N_1 \times \frac{d\Phi_m}{dt}$ Car on prend en compte les fuites de flux	Avec $\underline{E_2} = -N_2 \times \frac{d\Phi_m}{dt}$ Car on prend en compte les fuites de flux

c) Equation des courants :

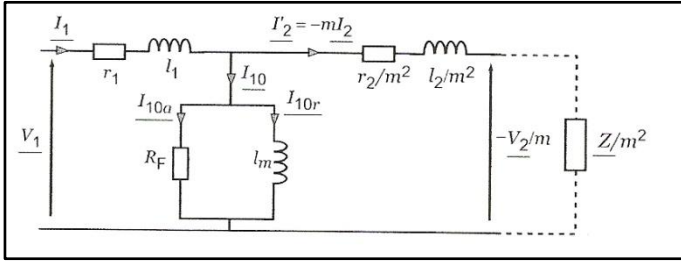
La transformateur étant une **machine à flux forcé** on peut partir de l'hypothèse que Φ_m ne change pas que le transformateur soit chargée ou à vide. Donc d'après la relation d'Hopkinson :

$N_1 \cdot \underline{I_1} + N_2 \cdot \underline{I_2} = N_1 \cdot \underline{I_{10}} = \mathcal{R} \cdot \Phi_m \Leftrightarrow \underline{I_1} = \underline{I_{10}} - \frac{N_2}{N_1} \cdot \underline{I_2}$ Et $m = \frac{N_2}{N_1}$ Donc $\underline{I_1} = \underline{I_{10}} - m \cdot \underline{I_2}$

4) Transformateur dans l'approximation de Kapp :

a) Circuit équivalent ramené au primaire :

Circuit équivalent du transformateur monophasé réel en charge ramené au primaire :



Remarque : Ce circuit équivalent est dit ramené au primaire. En effet, la **tension secondaire qui est reportée n'est pas celle que l'on mesure réellement à la sortie du générateur.**

L'hypothèse de Kapp consiste à supposer que le courant I_{10} est négligeable devant I_1 au voisinage de la charge nominale. Ainsi le circuit $R_f \parallel l_m$ peut être **remplacé par un circuit ouvert** (car $I_{10} = 0$).

Par suite, au voisinage de la charge nominale : $I'_2 = I_{1n}$ et $I_2 = I_{2n}$

Donc : $\frac{I_{2n}}{I_{1n}} = -\frac{1}{m}$ d'où $\frac{I_{2n}}{I_{1n}} = \frac{1}{m}$

Régime nominale : Condition de **fonctionnement pour lesquelles la machine est prévue.**

Dans ce régime, les **performances sont les meilleurs.**

Cela nous donne donc un schéma simplifié du transformateur ramené au primaire avec :

- Résistance totale ramenée au primaire : $R_p = r_1 + \frac{r_2}{m^2}$
- Réactance totale ramenée au primaire : $X_p = l_1 \omega + \frac{l_2 \omega}{m^2}$

Schéma simplifié du circuit ramené au primaire :

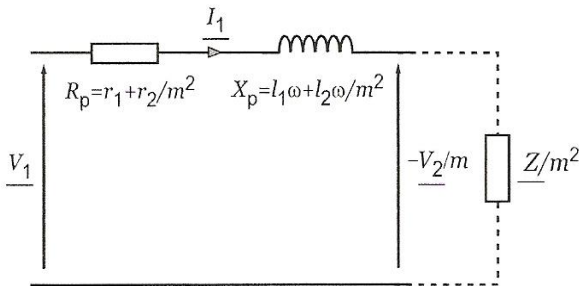
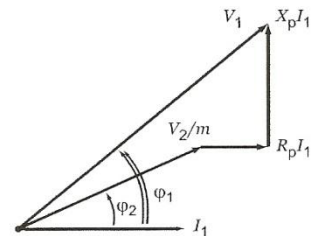


Diagramme de Kapp :



b) Circuit équivalent ramené au secondaire :

- Résistance totale ramenée au secondaire : $R_s = m^2 \cdot r_1 + r_2$
- Réactance totale ramenée au secondaire : $X_s = m^2 \cdot l_1 \cdot \omega + l_2 \cdot \omega$

Schéma simplifié du circuit ramené au secondaire :

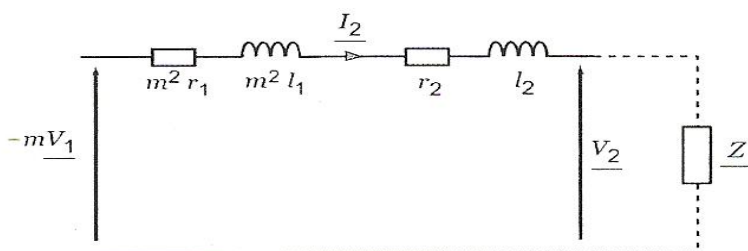
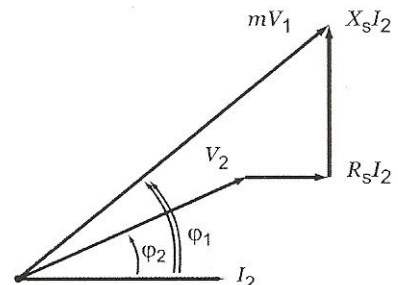


Diagramme de Kapp :

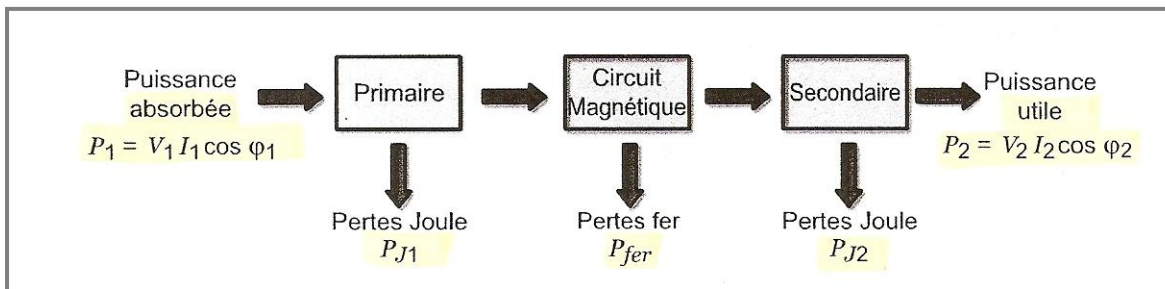


IV) Bilan énergétique et rendement :

1) Le rendement :

C'est le rapport de la puissance de sortie au secondaire sur la puissance d'entrée au primaire : $\eta = \frac{P_2}{P_1}$

Chaîne des pertes dans un transformateur :



Dans le cas du rendement, nous ne **regardons que les pertes et les puissances actives**.

Donc : $P_1 = P_{J1} + P_{J2} + P_{fer} + P_2 \Leftrightarrow P_2 = P_1 - P_{J1} - P_{J2} - P_{fer}$

Par suite : $\eta = \frac{P_1 - P_{J1} - P_{J2} - P_{fer}}{P_1} = \frac{P_2}{P_{J1} + P_{J2} + P_{fer} + P_2}$

2) Mesure pour le calcul du rendement :

- Mesure directe (par un Wattmètre) : **quasiment impossible** à utiliser car **rendement proche de 1** donc **P_1 et P_2 sont sensiblement les mêmes** et il est difficile de savoir si les **différences** qui les composent sont dû à la **réalité physique** ou si cela provient d'une **erreur de mesure**.
- Méthode des pertes séparées (utilisé en TP) : s'effectue grâce à 3 manipulations :

➤ 1^{ère} manipulation : essais à vide (= Mesurer les pertes fer) :

Tension primaire nominale = secondaire à vide, donc I_{10} très faible d'où :

$$P_{J0} + P_{\phi f_0} \ll P_{fer0}$$

Par suite, comme $P_{fer} = cste \Rightarrow P_{fer} = P_{10}$

➤ 2^{ème} manipulation : essais en court-circuit :

Circuit secondaire en court-circuit lorsque le **transformateur débite un courant nominal** donc $I_{2cc} = I_{2n}$ et $I_1 = I_{1n}$. Cependant pour cette **manipulation doit être sous-tension** c-à-d ne doit **pas dépasser 10% de sa valeur nominale**.

Et celle-ci étant négligeable, le flux magn. est peu important donc **P_{fer} négligeable** :

$$P_{1cc} = P_{fer} + P_{J1cc} + P_{J2cc} \Leftrightarrow P_{1cc} = P_{J1} + P_{J2} = P_J$$

➤ 3^{ème} manipulation : essais en charge :

En **régime nominale**, on mesure la **puissance absorbée au primaire P_1** , pour laquelle correspond les mesures faites précédemment.