

# ELECTROTECHNIQUE

## Chapitre 2 : Transformateur monophasé en régime sinusoidal

---



# Transformateur monophasé en régime sinusoïdal

## 1. Fonction et principe d'un transformateur

### 1.1 Rôle

- Un transformateur est une machine électrique statique permettant de modifier avec un excellent rendement, les valeurs de tension et d'intensité du courant délivrées par une source d'énergie électrique alternative, en tension et courant de valeurs différentes délivrées au récepteur, mais de même fréquence et de même forme.
- On le rencontre au niveau de l'alimentation de circuits électroniques et au niveau de la production, du transport et de la distribution de l'énergie dans les réseaux électriques alternatifs.



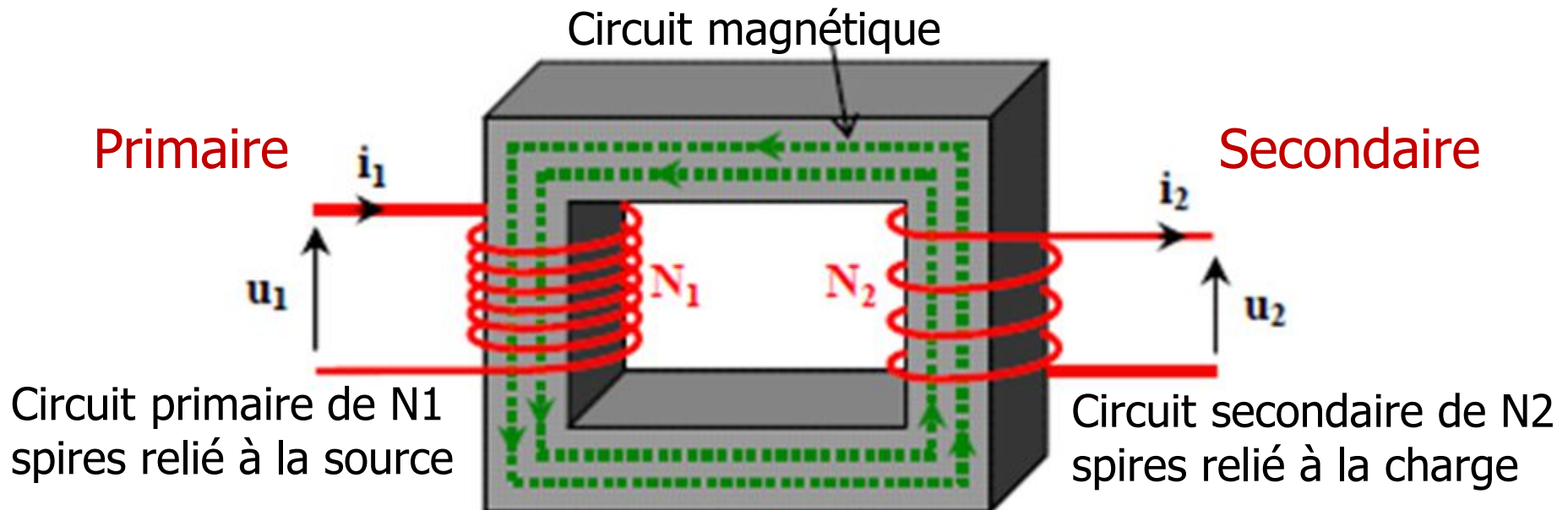
Transformateur monophasé

# Transformateur monophasé en régime sinusoïdal

## 1.2 Constitution

Un transformateur est formé par:

- Un circuit magnétique (CM) fermé, pour transmettre le plus efficacement possible l'énergie magnétique du primaire au secondaire: il doit être:
  - ✓ de perméabilité magnétique aussi haute que possible pour canaliser le flux.
  - ✓ d'hystérésis aussi faible que possible pour limiter les pertes par hystérésis;
  - ✓ feuilleté (tôles minces empilées) en acier au silicium afin de réduire les pertes ferromagnétiques par courants de Foucault.
- Un circuit électrique comportant deux enroulements isolés électriquement l'un de l'autre bobinés sur le CM, appelés primaire et secondaire.



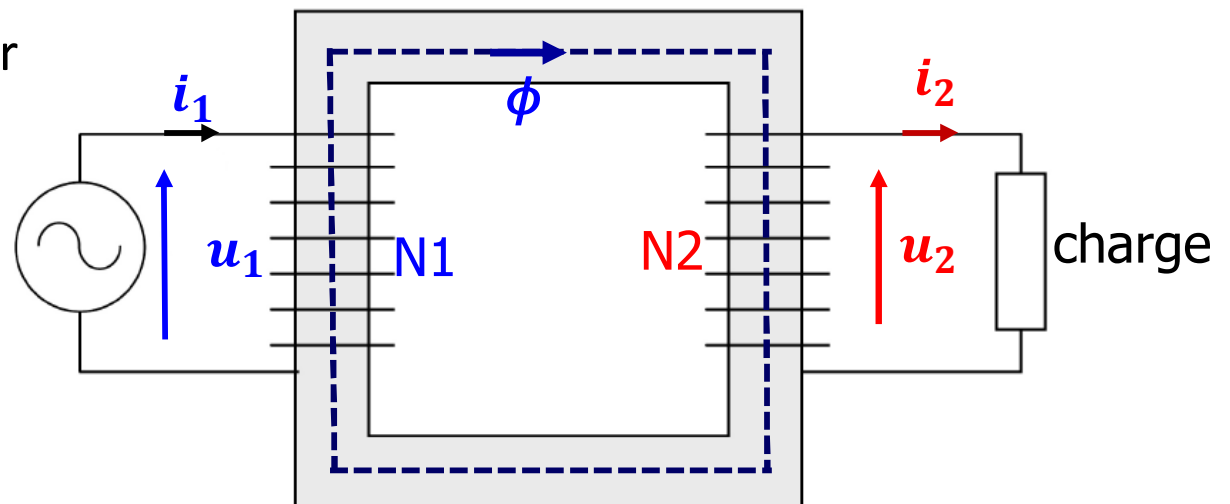
# Transformateur monophasé en régime sinusoïdal

- L'énergie est transférée du primaire au secondaire par l'intermédiaire du CM. Ces deux circuits sont alors magnétiquement couplés. Ceci permet de réaliser un isolement galvanique entre les deux circuits électriques.
- L'appellation primaire-secondaire correspond au sens prévu pour le transfert d'énergie, mais un transformateur est réversible.

## Fonctionnement:

- Le circuit primaire alimenté par le réseau sous la tension alternative  $u_1(t)$  engendre un flux magnétique  $\phi(t)$  variable dans le circuit magnétique.
- Le circuit secondaire est donc soumis à un flux variable, il est le siège d'une f.e.m induite. On observe donc une tension alternative  $u_2(t)$  aux bornes du secondaire pour alimenter une charge électrique.

**Remarque:** le transformateur ne peut pas fonctionner s'il est alimenté par une tension continue. Le flux doit être variable pour induire une f.e.m au secondaire.



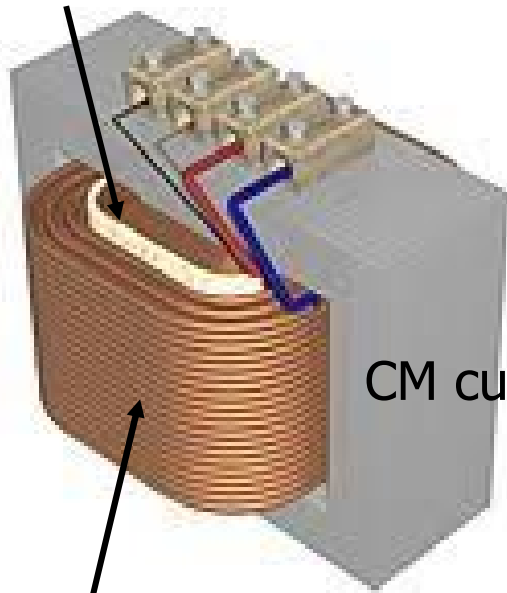
# Transformateur monophasé en régime sinusoïdal

Il y a deux types de circuits magnétiques:

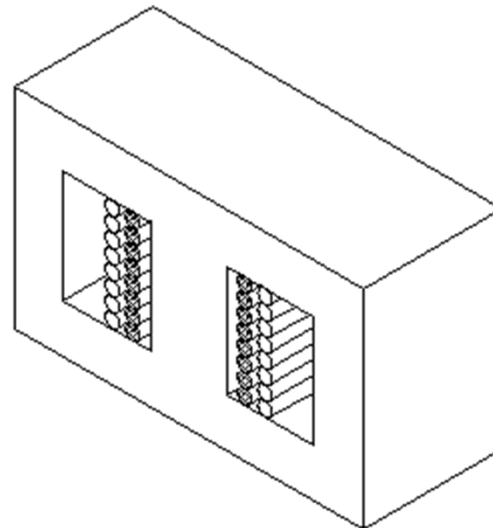
Circuit magnétique cuirassé et circuit magnétique à deux noyaux:

- Dans la technologie cuirassée, on utilise un circuit magnétique à trois branches, et les enroulements sont autour de la branche centrale (bobinage concentrique), pour minimiser les fuites de flux. Un isolant est inséré entre le circuit primaire et le secondaire.

Enroulement secondaire



CM cuirassé

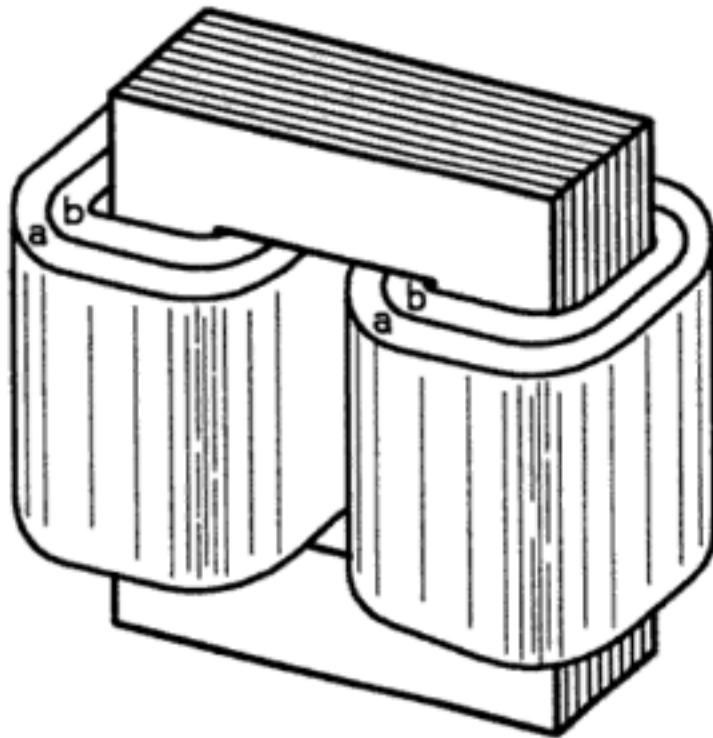


Enroulement primaire



## Transformateur monophasé en régime sinusoïdal

- Dans la technologie à deux noyaux, un circuit magnétique à deux colonnes est utilisé. chaque colonne portant la moitié des bobinages primaires et secondaires pour obtenir le meilleur couplage possible avec le minimum de cuivre.



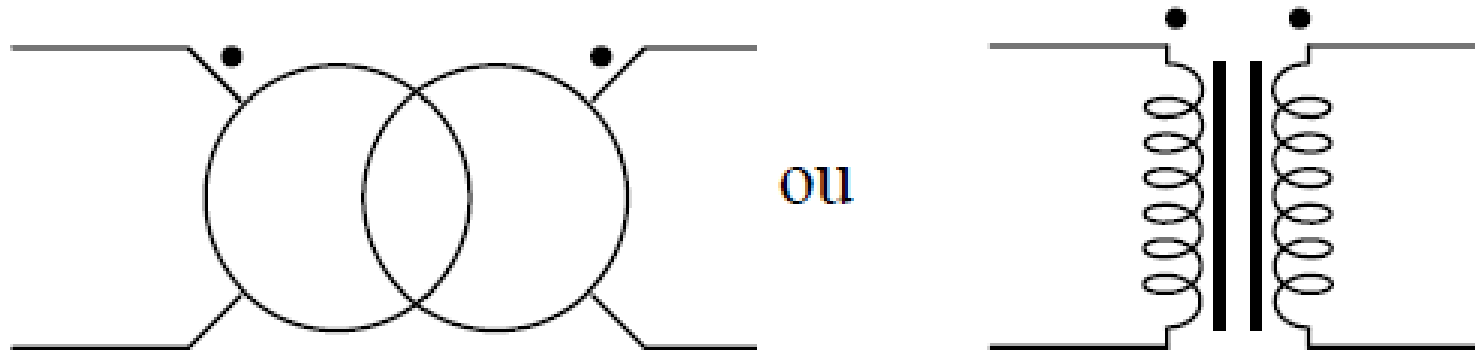
CM à deux noyaux



# Transformateur monophasé en régime sinusoïdal

## 1.4 Bornes homologues

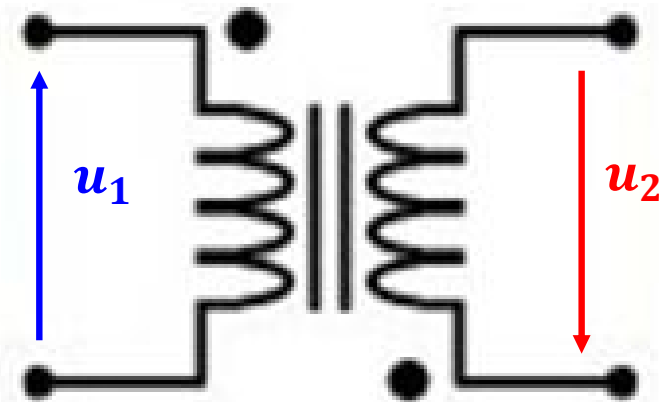
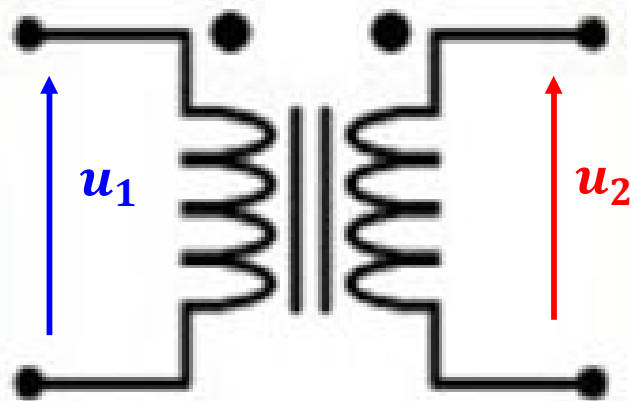
Symbole du transformateur monophasé:



- Le sens du bobinage détermine le sens du flux, donc le sens des tensions induites.
- On repère le sens du bobinage par des points (•) (appelés **marques de polarité**). Les bornes ainsi marquées sont appelées **bornes homologues**, qui correspondent à des points de même polarités instantanées.
- Si un courant entre par ces bornes, il crée un flux positif dans le circuit magnétique (négatif pour un courant sortant).
- Un courant entrant par une borne homologue contribue à des ampères-tours de signe pris conventionnellement positif (et donc négatif pour un courant sortant).

# Transformateur monophasé en régime sinusoïdal

- Des tensions pointant vers des bornes homologues sont de même signe. (donc en phase en régime sinusoïdal).
- On peut déterminer les bornes homologues à l'aide d'un oscilloscope: on alimente le primaire avec une tension sinusoïdale et on observe les tensions présentes sur chacune des bornes présumées homologues. Si les tensions sont en phase, les bornes sont effectivement homologues.



Les tensions primaire  $u_1$  et secondaire  $u_2$  sont en phase.

# Transformateur monophasé en régime sinusoïdal

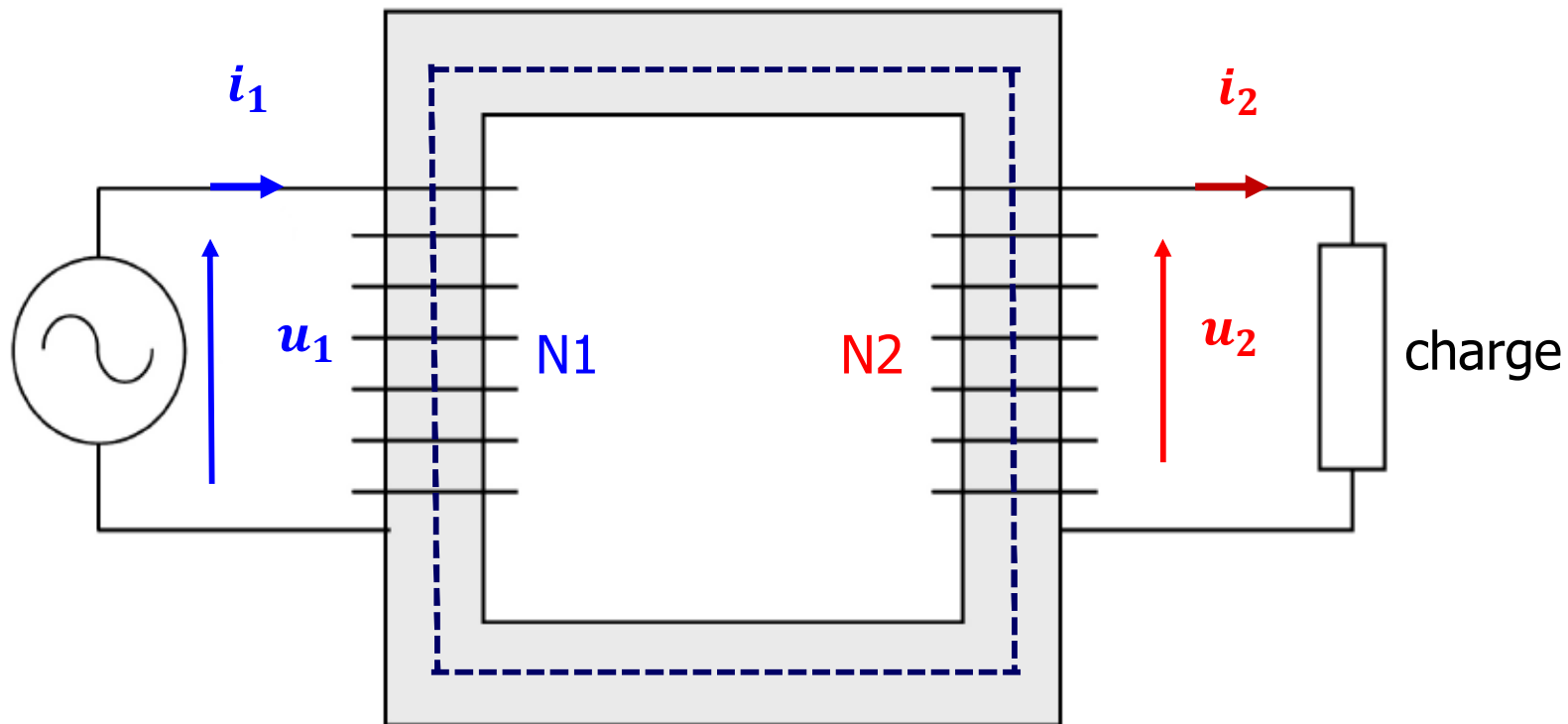
## 2. Equations générales de fonctionnement

### Représentation - Convention

#### Orientation des tensions et courants:

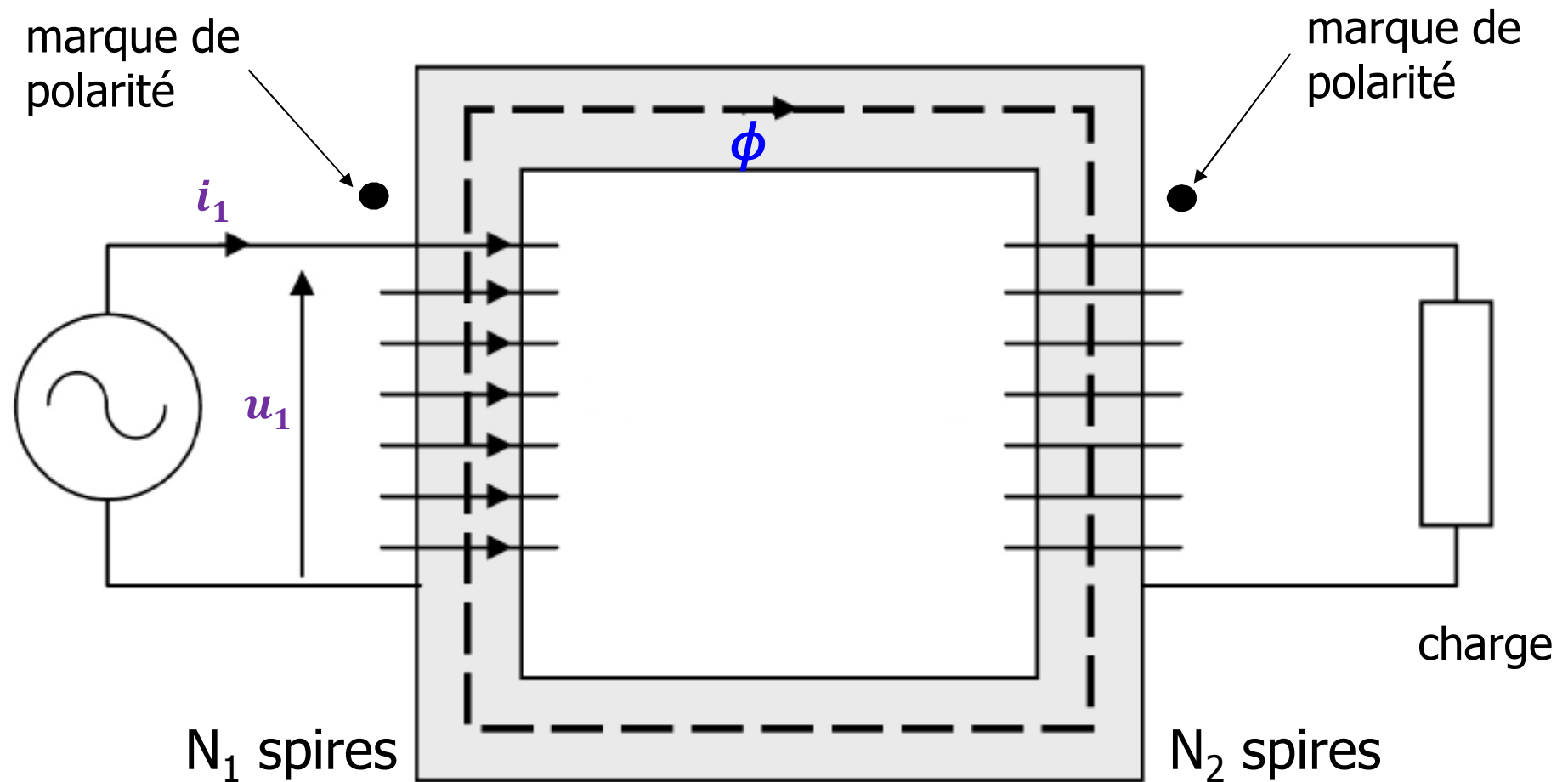
Les tensions et courants sont orientés en utilisant la convention récepteur au primaire et la convention générateur au secondaire

- Convention récepteur: Le primaire reçoit de la puissance du réseau.
- Convention générateur: Le secondaire fournit de la puissance à la charge.



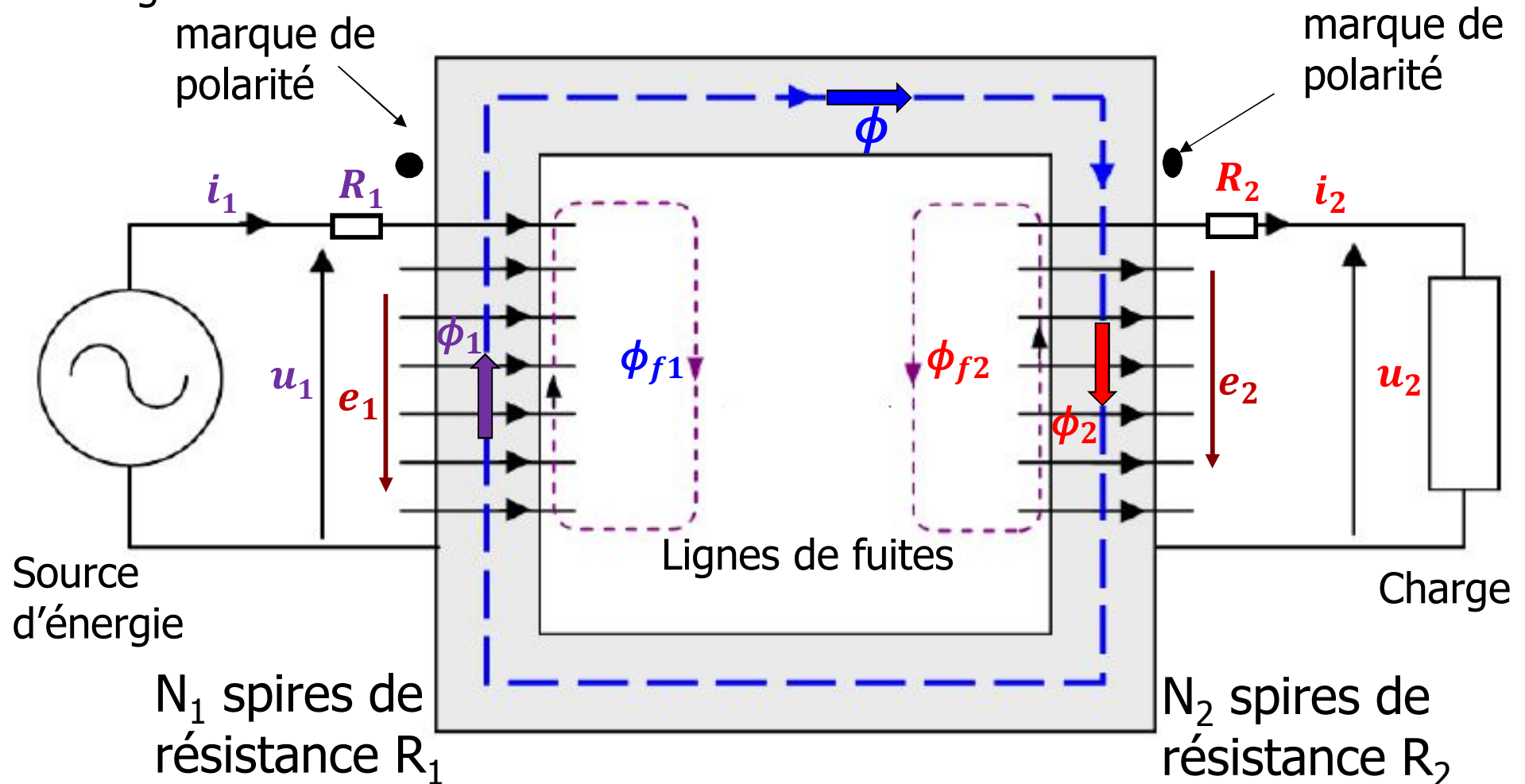
# Transformateur monophasé en régime sinusoïdal

- Le sens du courant primaire  $i_1$  détermine le sens du flux magnétique dans le circuit magnétique.



# Transformateur monophasé en régime sinusoïdal

- Les tensions  $u_1$  et  $u_2$  pointent vers les bornes homologues sont en phase.
- Le courant primaire  $i_1 > 0$  impose un flux dans le CM dans le sens positif.
- Le courant secondaire  $i_2 > 0$  impose un flux dans le CM dans le sens négatif.



# Transformateur monophasé en régime sinusoïdal

## Notations :

Grandeurs	Désignation
$u_1; u_2$	Tensions au primaire et au secondaire
$i_1; i_2$	Intensités de courant au primaire et au secondaire
$l_{f1}; l_{f2}$	Inductances de fuites au primaire et au secondaire
$R_1; R_2$	Résistances des bobinages au primaire et au secondaire
$\phi$	Flux commun aux deux enroulements (que l'on appelle flux utile), circulant dans le circuit magnétique
$\phi_1; \phi_2$	Flux par spire des enroulements primaire et secondaire
$\phi_{f1}; \phi_{f2}$	Flux de fuites par spire du primaire et du secondaire
$\mathcal{R}$	Réductance du circuit magnétique
$e_1; e_2$	Forces électromotrices induites au primaire et au secondaire

# Transformateur monophasé en régime sinusoïdal

## Expression des flux :

- Flux traversant une spire du primaire et du secondaire:

$$\phi_1 = (\phi + \phi_{f1})$$

$$\phi_2 = (\phi - \phi_{f2})$$

- Flux totaux à travers les enroulements primaire et secondaire:

$$N_1\phi_1 = N_1(\phi + \phi_{f1})$$

$$N_2\phi_2 = N_2(\phi - \phi_{f2})$$

- Flux totaux de fuites sont proportionnels aux intensités des courants qui les produisent:

$$N_1\phi_{f1} = l_{f1}i_1$$

$$N_2\phi_{f2} = l_{f2}i_2$$

## Expression des f.e.m. induites: (loi de Lenz-Faraday)

- Force électromotrice induite aux bornes de la bobine du primaire (f.e.m d'auto-induction):

$$e_1 = -N_1 \frac{d\phi_1}{dt} = -N_1 \frac{d\phi}{dt} - N_1 \frac{d\phi_{f1}}{dt}$$

- Force électromotrice induite aux bornes de la bobine du secondaire:

$$e_2 = -N_2 \frac{d\phi_2}{dt} = -N_2 \frac{d\phi}{dt} + N_2 \frac{d\phi_{f2}}{dt}$$

# Transformateur monophasé en régime sinusoïdal

**Relation entre les courants:** Loi d'Hopkinson appliquée au circuit magnétique traversé par le flux commun  $\phi$  aux deux enroulements:

$$N_1 i_1 - N_2 i_2 = \mathcal{R}\phi \quad (1)$$

**Expression des tensions:** Loi d'Ohm généralisée:

- Tension au primaire:

$$u_1 = R_1 i_1 - e_1 = R_1 i_1 + l_{f1} \frac{di_1}{dt} + N_1 \frac{d\phi}{dt} \quad (2)$$

- Tension au secondaire:

$$u_2 = -R_2 i_2 - e_2 = -R_2 i_2 - l_{f2} \frac{di_2}{dt} + N_2 \frac{d\phi}{dt} \quad (3)$$

## Remarque:

- La tension primaire  $u_1$  est imposée par le réseau d'alimentation.
- Les courants primaire  $i_1$  et secondaire  $i_2$ , et la tension secondaire  $u_2$  sont des inconnus imposés par la charge.
- La résolution théorique de ces équations détermine le fonctionnement du transformateur.
- On peut introduire des simplifications pour élaborer un modèle simple du transformateur, c'est le **transformateur parfait**, très important, et dans la plupart des applications le comportement du transformateur réel sera très proche de celui du transformateur parfait.

# Transformateur monophasé en régime sinusoïdal

## 3. Transformateur parfait (TP)

### 3.1 Hypothèses:

On suppose que le transformateur ne présente aucune perte :

- Les pertes Joules (ou pertes cuivre) dans les bobinages sont considérées comme nulle ( $R_1 = R_2 = 0$ ).
- Les pertes fer (par Hystérésis et par courants de Foucault) sont considérées comme négligeables.
- Le noyau ferromagnétique est infiniment perméable ( $\mu = \infty \Rightarrow \mathcal{R} = 0$ )
- Les fuites magnétiques sont négligeables ( $l_{f1} = l_{f2} = 0$ ).
- Le circuit magnétique ne sature pas (toutes les grandeurs, telles que tension, courant, champ magnétique et flux magnétique sont alternative sinusoïdale).

**Remarque:** le transformateur réel est, numériquement, assez proche d'un TP, et ce d'autant plus que le transformateur est de grande puissance.

- Les équations générales se simplifient:

$$\begin{cases} N_1 i_1 - N_2 i_2 = 0 \\ u_1 = N_1 \frac{d\phi}{dt} \\ u_2 = N_2 \frac{d\phi}{dt} \end{cases}$$

Équations du transformateur parfait

# Transformateur monophasé en régime sinusoïdal

## Relations fondamentales d'un TP:

- Rapport de transformation du transformateur:

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

- Relation entre tensions et entre courants:

$$\frac{u_2}{u_1} = \frac{i_2}{i_1} = m$$

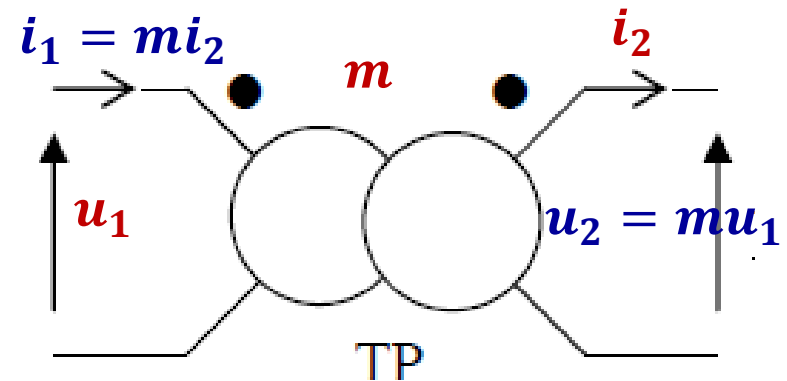
## Symbole du transformateur parfait

Si  $u_1$  est une tension alternative sinusoïdale de fréquence  $f = 50\text{Hz}$ , la tension  $u_2$  est aussi une tension alternative sinusoïdale de même fréquence, de valeur efficace  $U_2$  différente de la valeur efficace  $U_1$  de la tension au primaire.

## Remarque:

avec les valeurs efficaces:  $m = \frac{N_2}{N_1} = \frac{U_2}{U_1} = \frac{I_1}{I_2}$

- Si  $m > 1 \Rightarrow U_2 > U_1$ ; le transformateur est dit élévateur,
- Si  $m < 1 \Rightarrow U_2 < U_1$ ; le transformateur est dit abaisseur,
- Si  $m = 1 \Rightarrow U_2 = U_1$ ; le transformateur sert de sécurité ou d'isolement.



Équations du TP avec les bornes homologues choisies

# Transformateur monophasé en régime sinusoïdal

## 3.2 Formule de Boucherot

- En régime sinusoïdal, l'enroulement primaire est alimenté par une tension sinusoïdale:  $u_1(t) = U_1\sqrt{2}\cos(\omega t)$
- Le flux est donné par la relation:

$$u_1(t) = N_1 \frac{d\phi(t)}{dt}$$

- Par intégration, le flux s'écrit sous la forme:

$$\phi(t) = \frac{U_1\sqrt{2}}{N_1\omega} \sin(\omega t) = \frac{U_1\sqrt{2}}{N_1\omega} \cos(\omega t - \pi/2) = \phi_{max} \cos(\omega t - \pi/2)$$

- La valeur maximale du flux est donnée par:

$$\phi_{max} = \frac{U_1\sqrt{2}}{N_1 2\pi f} \quad \text{Le flux est forcé par la tension primaire } U_1$$

La tension primaire  $U_1$  impose donc bien le flux  $\phi$ .

- Formule de Boucherot:

$$U_1 = 4,44fN_1\phi_{max} ; U_2 = 4,44fN_2\phi_{max}$$

### Remarque:

Connaissant  $U_1$ ;  $U_2$ ;  $f$  et  $\phi_{max}$ , on peut en déduire le nombre de spires des enroulements du transformateur.

# Transformateur monophasé en régime sinusoïdal

## Conclusion:

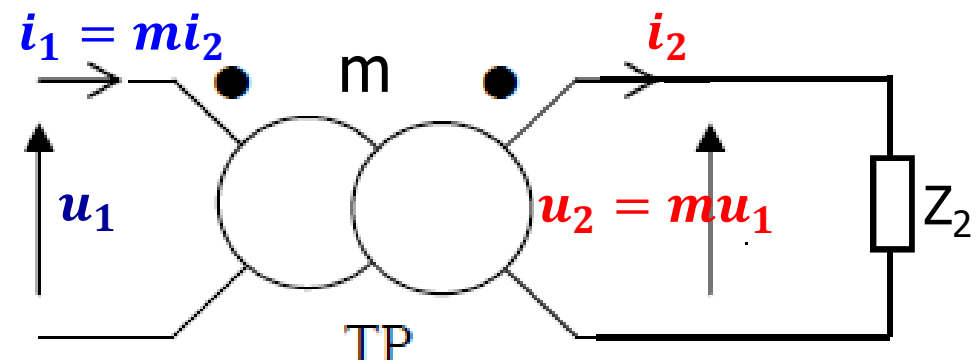
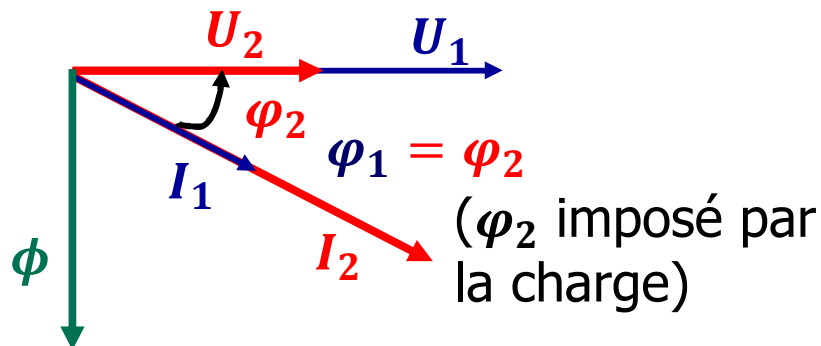
- Le flux à travers le circuit magnétique est indépendant de la charge (que soit le courant  $i_2$ ), il ne dépend que de la tension  $U_1$  ( $U_1 = cst \Rightarrow \phi_{max} = cst$  à  $f = cst$ ).
- Le transformateur est donc une machine à **flux forcé**. La tension d'alimentation au primaire impose l'état magnétique du circuit magnétique.

## 3.2 Conservation de puissance

Lorsque l'on branche une charge au secondaire d'un transformateur, elle impose le courant  $i_2$  et donc le courant  $i_1 = mi_2$  et aussi le déphasage  $\varphi_2$  entre le courant et la tension au secondaire .

### Diagramme de Fresnel:

Les équations d'un transformateur parfait sont:  $u_2 = mu_1$  et  $i_1 = mi_2$   
Les tensions (et les courants) au primaire et au secondaire sont en phase.



# Transformateur monophasé en régime sinusoïdal

- Les puissances active, réactive et apparente absorbées par le primaire sont:

$$P_1 = U_1 I_1 \cos(\varphi_1); \quad Q_1 = U_1 I_1 \sin(\varphi_1); \quad S_1 = U_1 I_1$$

- Les puissances active, réactive et apparente débitées par le secondaire sont:

$$P_2 = U_2 I_2 \cos(\varphi_2); \quad Q_2 = U_2 I_2 \sin(\varphi_2); \quad S_2 = U_2 I_2$$

## En conclusion:

- Dans un transformateur parfait, il y a transfert de toutes les puissances du primaire vers le secondaire.
- La puissance apparente absorbée au primaire est donc égale à la puissance apparente débitée par le secondaire. Il s'ensuit que les puissances active et réactive débitées par le secondaire sont exactement égales à celles absorbées par le primaire.

$$P_1 = P_2; \quad Q_1 = Q_2; \quad S_1 = S_2; \quad \varphi_1 = \varphi_2$$

- Le rendement du transformateur est égal au rapport de la puissance active  $P_2$  fournie à la charge et de la puissance active  $P_1$  absorbée par le primaire

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

- Pour un transformateur parfait:  $\eta = 1$

# Transformateur monophasé en régime sinusoïdal

## 3.3 Transferts d'impédance

- Équations du TP, en valeurs complexes, on a:

$$\underline{U}_1 = \underline{U}'_1 + \underline{Z}_1 \underline{I}_1$$

$$\underline{U}_2 = m\underline{U}'_1 = m\underline{U}_1 - m \underline{Z}_1 \underline{I}_1$$

$$\underline{U}_2 = m\underline{U}_1 - \underline{Z}_2 \underline{I}_2$$

- Donc:

$$\underline{U}_2 = m\underline{U}_1 - m^2 \underline{Z}_1 \underline{I}_2$$

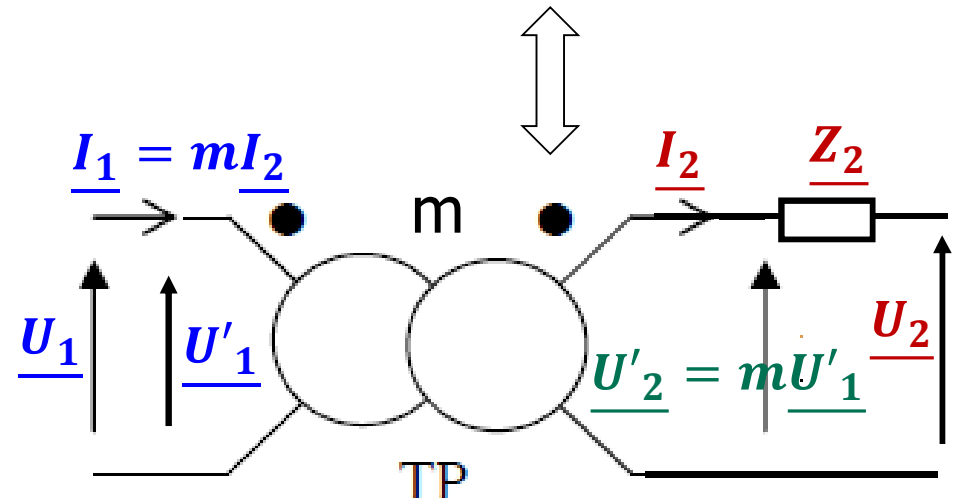
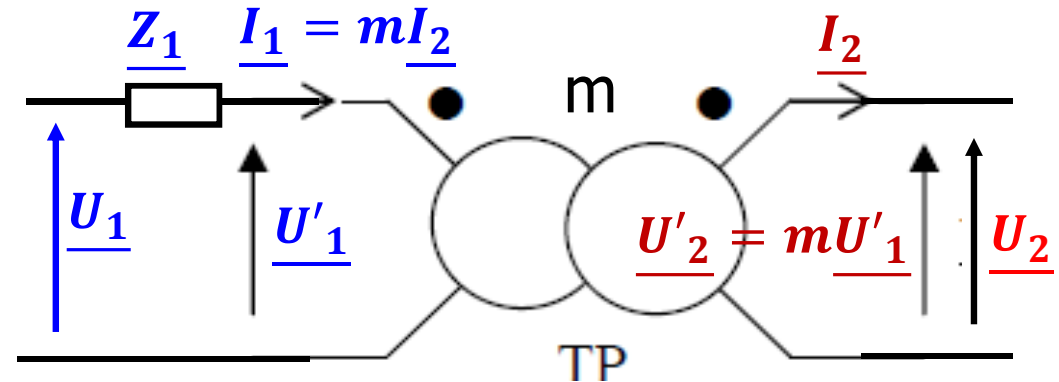
- Par identification:

$$\underline{Z}_2 = m^2 \underline{Z}_1$$

$$\underline{Z}_1 = \underline{Z}_2 / m^2$$

### Conclusion:

Pour ramener une impédance du primaire vers le secondaire d'un TP, il faut la multiplier par  $m^2$ . Pour transférer une impédance du secondaire vers le primaire d'un TP, il faut la diviser par  $m^2$ .



# Transformateur monophasé en régime sinusoïdal

## 4. Transformateur réel

Pour un transformateur réel, on tient compte des imperfections négligées au cours de l'étude du transformateur parfait:

- Résistances des enroulements.
- Fuites magnétiques.
- Pertes fer.
- Perméabilité du circuit magnétique n'est pas infinie (réductance faible, mais n'est pas nulle).

### 4.1 Influence de la réductance du circuit magnétique

Si on tient compte de la réductance et on considère que les résistances des bobines et les fuites magnétiques sont faibles.

Les équations générales de fonctionnement s'écrivent:

$$\begin{aligned} N_1 i_1 - N_2 i_2 &= \mathcal{R} \phi \\ \left. \begin{aligned} u_1 &= N_1 \frac{d\phi}{dt} \\ u_2 &= N_2 \frac{d\phi}{dt} \end{aligned} \right\} \Rightarrow u_2 = m u_1 \end{aligned}$$

# Transformateur monophasé en régime sinusoïdal

**Fonctionnement à vide:**  $i_2 = 0$ . L'enroulement secondaire n'est relié à aucune charge électrique.

- À vide, le primaire se comporte comme une bobine à noyau de fer de  $N_1$  spires. Une tension est induite au secondaire  $u_{20}$ .
- À vide le primaire absorbe le courant  $i_1 = i_{10}$  qui assure la production du flux magnétique commun  $\phi$ , c'est le courant magnétisant.

$$N_1 i_{10} = \mathcal{R}\phi \Rightarrow i_{10} = \frac{\mathcal{R}\phi}{N_1}$$

$N_1 i_{10}$  est le "nombre d'ampères-tours ou f.m.m" à vide nécessaire à la magnétisation du circuit magnétique.

**Fonctionnement en charge:**  $i_2 \neq 0$

- En charge, le secondaire appelle un courant  $i_2$ . D'après la formule de Boucherot, le flux est forcé par la valeur efficace  $U_1$  de la tension primaire (indépendant de la charge):  $U_1 = cst \Rightarrow \phi_{max} = cst \Rightarrow I_{10} = cst$ .
- Le "nombre d'ampères-tours" à vide est le même que le "nombre d'ampères-tours" en charge pour la même tension primaire  $U_1$ :

$$N_1 i_1 - N_2 i_2 = \mathcal{R}\phi = N_1 i_{10}$$

- Le primaire appelle un courant  $i_1$  tel que:

$$i_1 = i_{10} + i_{1t}; \quad i_{1t} = \frac{N_2}{N_1} i_2 = m i_2$$

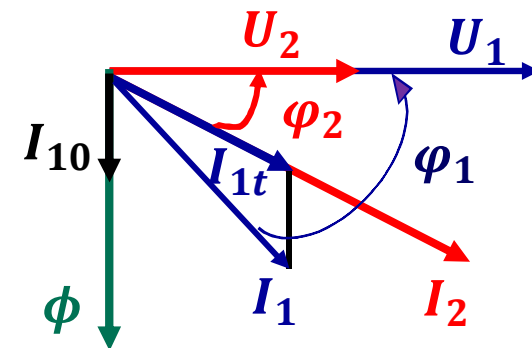
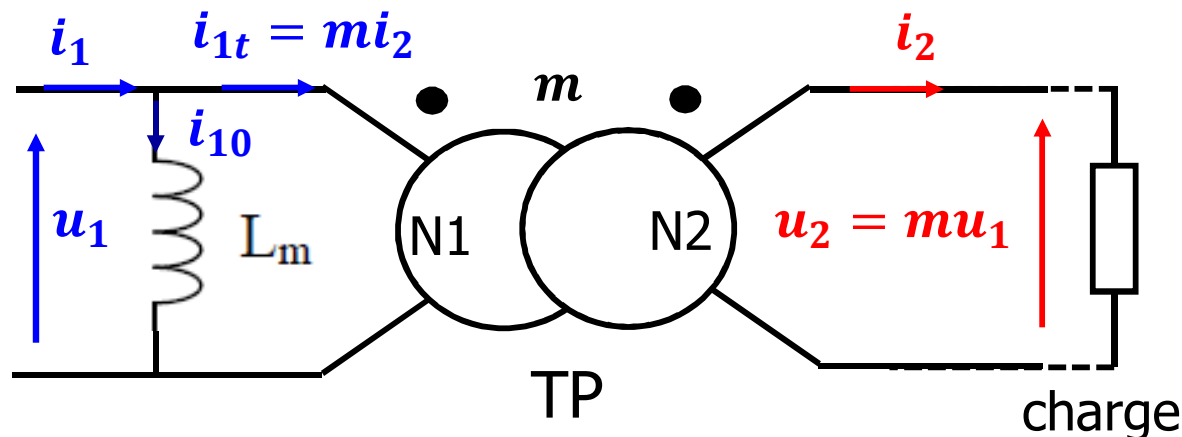
# Transformateur monophasé en régime sinusoïdal

En charge le courant  $i_1$  absorbé au primaire, est la somme de deux courants:

- ✓ Le courant magnétisant  $i_{10}$ , qui crée le flux magnétique.
- ✓ Le courant de travail (ou courant utile)  $i_{1t} = mi_2$  proportionnel au courant  $i_2$  débité dans la charge, qui assure le transfert d'énergie du primaire vers le secondaire à travers le circuit magnétique.

**Schéma équivalent** du transformateur réel qui comprend:

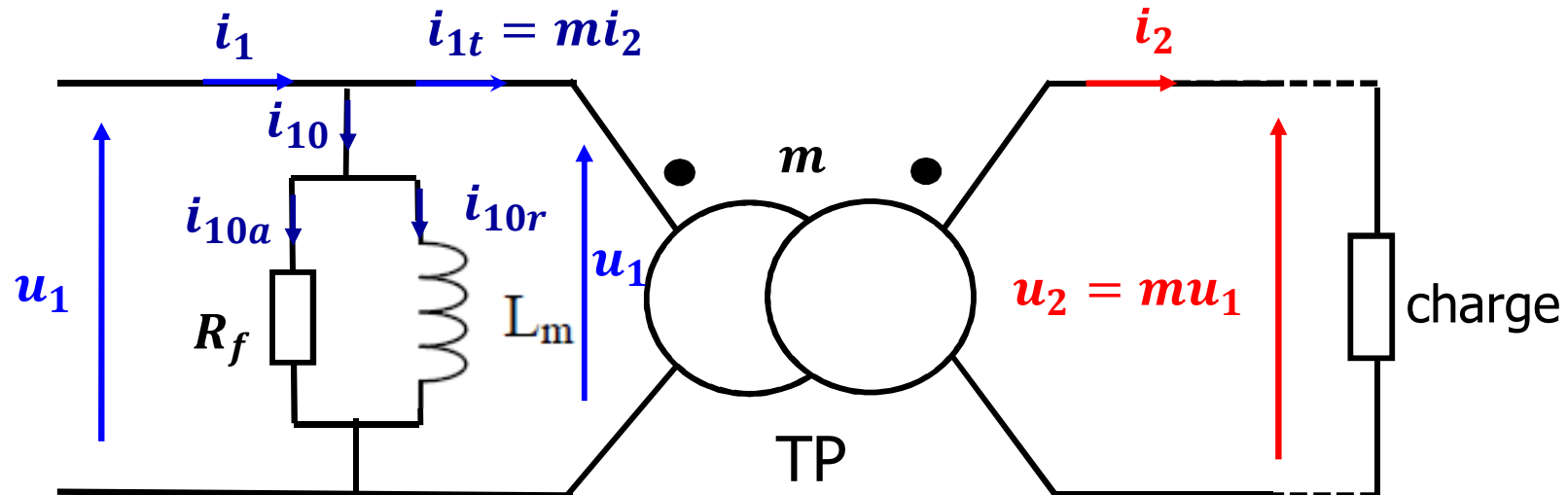
- Un transformateur parfait de même nombres de spires  $N_1$  et  $N_2$  que le transformateur réel,
- Une inductance magnétisante  $L_m$  en parallèle et dans laquelle passe le courant magnétisant  $i_{10}$  ( $N_1\phi = L_m i_{10}$ ).



# Transformateur monophasé en régime sinusoïdal

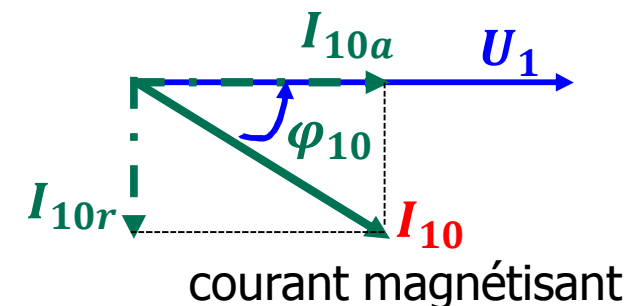
## 4.2. Influence des pertes Fer

Le flux alternatif engendre, par hystérésis et courants de Foucault, un échauffement du circuit magnétique: Les « pertes fer » sont modélisées par une résistance  $R_f$  en parallèle avec  $L_m$ . Ces pertes sont présentes dès l'application de la tension  $u_1$  à l'enroulement primaire.



### Diagramme de Fresnel:

- $i_{10a}$  composante active en phase avec la tension  $u_1$ , correspondant aux pertes fer.
- $i_{10r}$  composante réactive en quadrature par rapport à  $u_1$  correspondant à la magnétisation.



# Transformateur monophasé en régime sinusoïdal

- Le facteur de puissance  $\cos\varphi_{10}$  du transformateur à vide est très mauvais et est de l'ordre de 0,2. Il consomme du courant réactif  $i_{10r}$ .

## 4.3. Schéma équivalent complet

- Lorsque les courants sont importants, on doit tenir compte des chutes de tension dans les résistances et dans les inductances de fuites, pour rendre compte de l'ensemble des imperfections. Le courant magnétisant et les pertes fer restent liées au flux, donc à la tension primaire  $u_1$ .
- Les équations du transformateur réel sont:

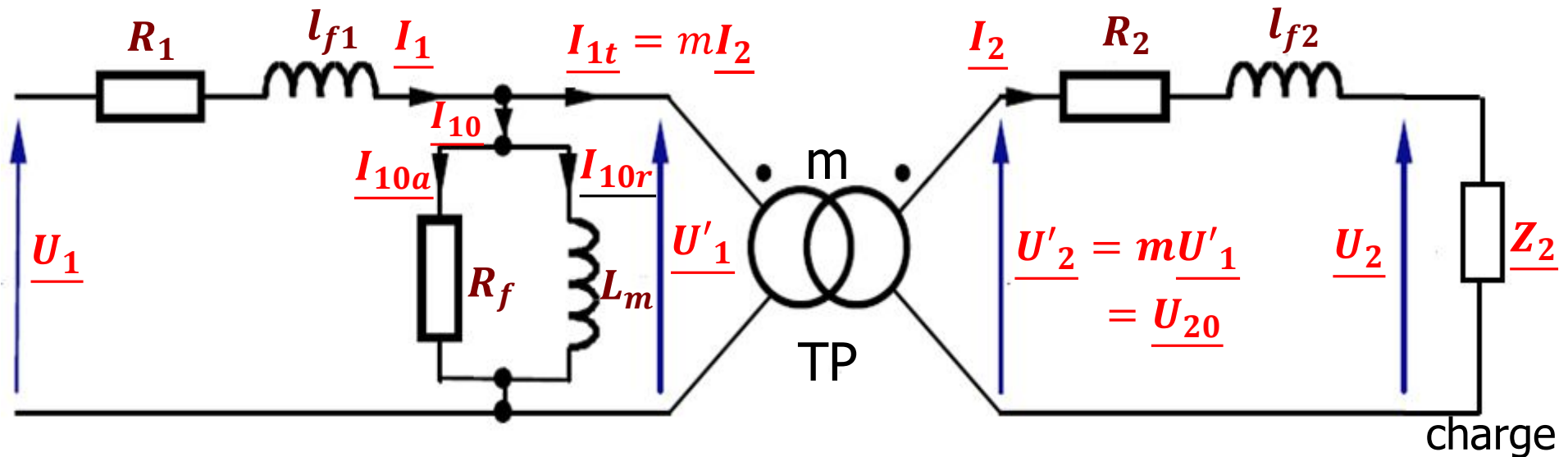
$$\begin{aligned}u_1 &= R_1 i_1 + l_{f1} \frac{di_1}{dt} + u'_1 \\u_2 &= -R_2 i_2 - l_{f2} \frac{di_2}{dt} + u'_2 \\i_1 &= i_{10} + i_{1t}\end{aligned}$$

Avec:

$$\left. \begin{aligned}u'_1 &= N_1 \frac{d\phi}{dt} \\u'_2 &= N_2 \frac{d\phi}{dt} \\i_{1t} &= \frac{N_2}{N_1} i_2\end{aligned} \right\} \Rightarrow u'_2 = m u'_1; i_{1t} = m i_2 \quad \text{Équations du TP}$$

# Transformateur monophasé en régime sinusoïdal

- On obtient le schéma équivalent du transformateur réel en charge:



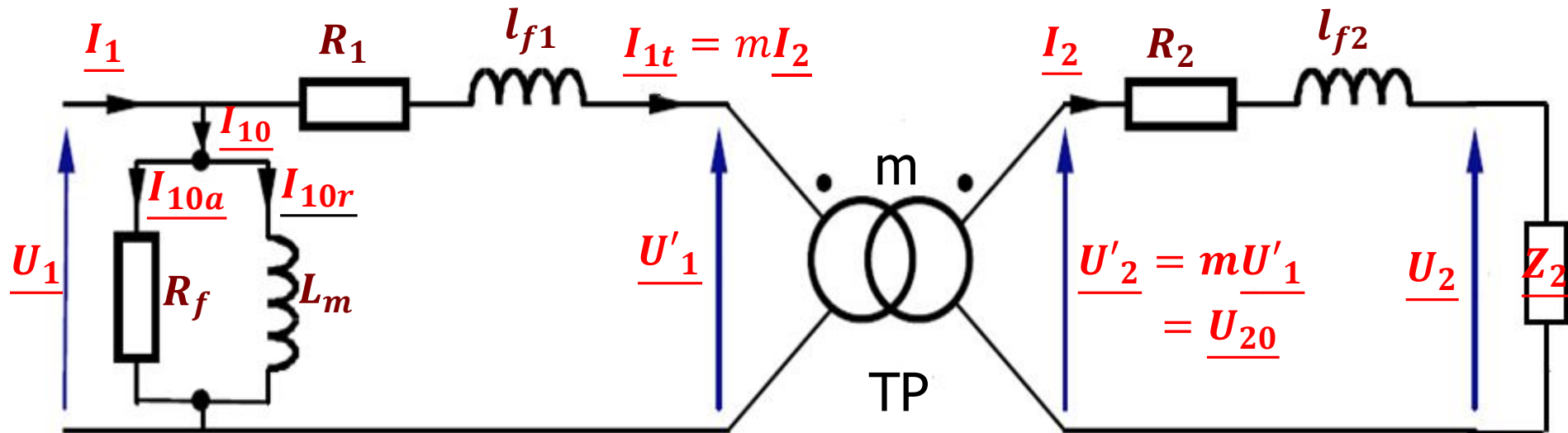
## Remarque:

- À vide:** à cause de la saturation et l'hystérésis, le courant primaire  $i_{10}$  n'est pas sinusoïdal bien que la tension primaire  $u_1$  soit sinusoïdale.
- En charge:** les courants  $i_1$  et  $i_2$  sont pratiquement sinusoïdaux car en charge on peut négliger  $i_{10}$  devant  $i_1$ .
- L'usage du schéma réel du transformateur monophasé en charge est difficile (ses paramètres sont de mesure difficile, comme les inductances de fuites), on préfère utiliser le schéma simplifié dans l'hypothèse de Kapp, plus commode d'emploi.

# Transformateur monophasé en régime sinusoïdal

## 4.4. Schéma équivalent dans l'hypothèse de Kapp :

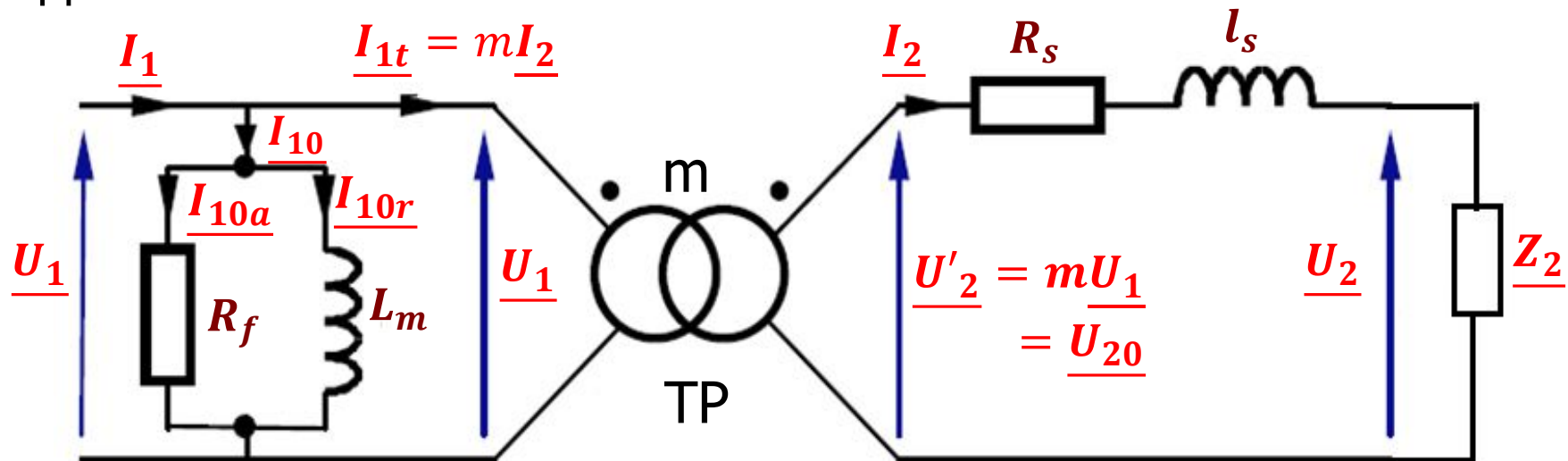
- L'approximation de Kapp consiste à négliger le courant  $I_{10}$  devant le courant  $I_1$  lorsque le transformateur fonctionne en charge (en pratique  $I_{10}$  est de l'ordre de 5 à 15% du courant primaire nominal  $I_{1n}$  dans les transformateurs industriels usuels de moyenne et grande puissance).
- On peut **négliger la chute de tension dans  $R_1$  et  $l_{f1}$  devant la tension primaire  $U_1$** , ainsi avec une excellente approximation on peut rapporter la branche de magnétisation ( $R_f, L_m$ ) à l'entrée du schéma.



Dans le schéma avec l'approximation de Kapp, la branche de magnétisation est soumise à  $\underline{u}_1$  au lieu de  $\underline{u}'_1$ ; le flux est forcé par la tension primaire  $\underline{u}_1$ .

# Transformateur monophasé en régime sinusoïdal

Le transformateur étant destiné à alimenter une charge. On peut réduire le schéma en utilisant la formule de transfert d'impédances du primaire au secondaire d'un transformateur parfait. On obtient le schéma équivalent de Kapp ramené au secondaire :



Avec:

- $R_s = R_2 + m^2 R_1$ : résistance totale des enroulements ramenée au secondaire,
- $l_s = l_{f2} + m^2 l_{f1}$ : inductance de fuite totale ramenée au secondaire,
- $m = \frac{N_2}{N_1} = \frac{U_{20}}{U_1}$ : rapport de transformation à vide.

À vide:  $i_2 = 0 \Rightarrow i_{1t} = 0$ ;  $u_2 = u_{20} = u'_2$  et  $u_1 = u'_1$ , donc  $u_{20} = mu_1$

# Transformateur monophasé en régime sinusoïdal

## 4.5. Caractéristiques pratiques d'un transformateur

### Plaque signalétique:

Un transformateur est conçu pour fonctionner dans certaines conditions, appelées conditions de fonctionnement nominal. La plaque signalétique d'un transformateur donne ce fonctionnement.

- La fréquence d'utilisation  $f$  (Hz).
- La tension efficace nominale primaire  $U_{1n}$ .
- La tension efficace secondaire à vide  $U_{20}$  sous la tension primaire nominale  $U_{1n}$ ; ( $i_2 = 0$ ).
- La puissance apparente nominale  $S_n$  (puissance maximale que peut transférer le transformateur sans échouement anormal, c-à-d. sans pertes anormales), qui sert de base à la construction du transformateur. Elle se conserve au voisinage des conditions nominales:  $S_n = U_{1n}I_{1n} = U_{20}I_{2n}$  (le comportement du transformateur étant proche du transformateur idéal,  $S_{1n} = S_{2n} = S_n$ ;  $I_{1n} \approx mI_{2n}$ ).

### Remarque:

- La valeur nominale d'une grandeur est la valeur préconisée par le constructeur pour que le fonctionnement soit optimal.

# Transformateur monophasé en régime sinusoïdal

## Exemple:

La plaque signalétique comporte les indications suivantes : 600VA ; 220V/24V et 50Hz. Ces indications permettent de calculer:

- Le rapport de transformation:

$$m = \frac{U_{20}}{U_{1n}} = \frac{24}{220} = 0,109$$

- L'intensité efficace du courant nominal au primaire:

$$I_{1n} = \frac{S_n}{U_{1n}} = \frac{600}{220} = 2,73A$$

- L'intensité efficace du courant nominal au secondaire:

$$I_{2n} = \frac{S_n}{U_{20}} = \frac{600}{24} = 25A$$

## Remarque:

- La puissance apparente nominale est en lien direct avec le volume du transformateur.
- Au-delà des courants nominaux, l'échauffement du cuivre est trop important.
- Si  $U_1 \gg U_{1n}$ , le courant magnétisant augmente et devient destructif (échauffement du CM par pertes fer, échauffement du bobinage primaire).

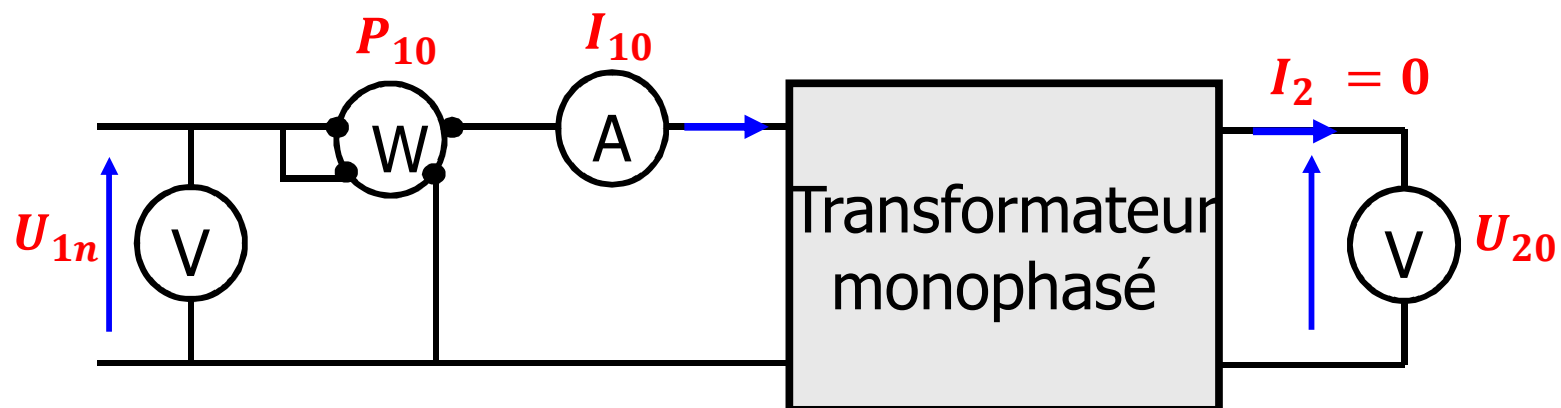
# Transformateur monophasé en régime sinusoïdal

## 4.6. Détermination expérimentale du schéma de Kapp

Les éléments du schéma de Kapp du transformateur peuvent être déterminés à partir de deux essais:

### □ Essai à vide sous tension nominale:

- Un essai à vide consiste à alimenter le transformateur sous sa tension primaire nominale  $U_{1n}$ , le secondaire étant en circuit ouvert ( $I_2 = 0$ )
- Des appareils de mesure permettent de mesurer :
  - ✓ la tension primaire à vide  $U_{10} = U_{1n}$ ,
  - ✓ l'intensité efficace du courant primaire:  $I_{10}$ ,
  - ✓ la puissance active absorbée par le primaire:  $P_{10}$ ,
  - ✓ la tension secondaire  $U_{20}$ .

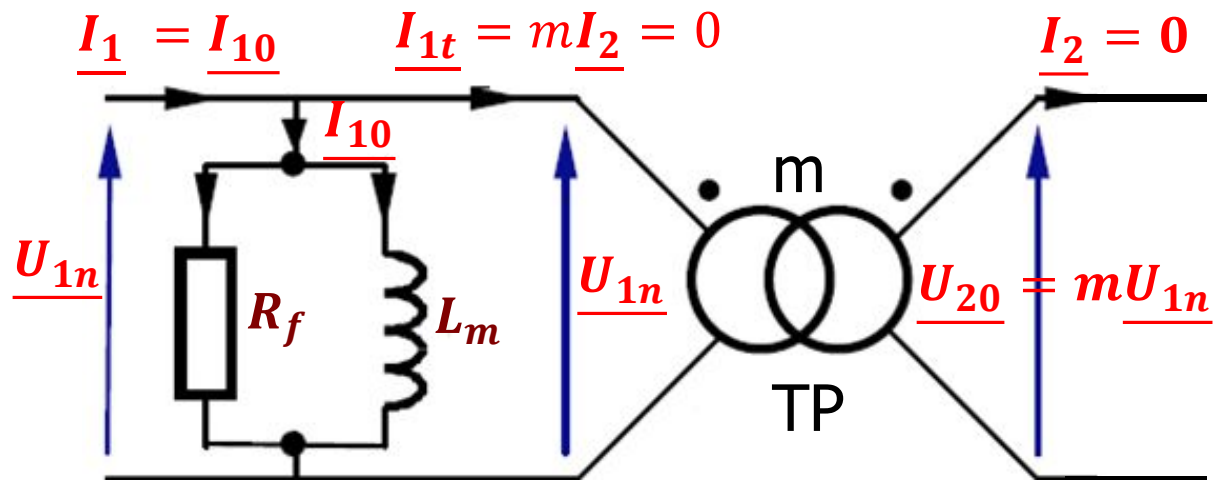


# Transformateur monophasé en régime sinusoïdal

- La puissance active  $P_{10}$  absorbée par le primaire se répartie:
  - ✓ dans le circuit magnétique (pertes fer  $P_{fer}$ );
  - ✓ dans l'enroulement primaire sous forme de pertes par effet Joule ( $P_J = R_1 I_{10}^2 + R_2 I_2^2 = R_1 I_{10}^2$ ).
- Comme le courant magnétisant  $I_{10}$  est faible, les pertes joule sont négligeables devant les pertes fer.
- L'essai à vide permet donc de déterminer les pertes fer:  $P_{10} = P_{fer}$

## Remarque:

- Les pertes fer ne dépendent que de  $U_1$  et de  $f$  (formule de Boucherot), pour l'essai à vide à tension nominale  $U_{1n}$ , elle sont donc nominales.
- Elle sont identiques à vide comme en charge.
- Dans le schéma de Kapp, toutes les résistances et les inductances de fuites sont ramenées au secondaire où le courant est nul.



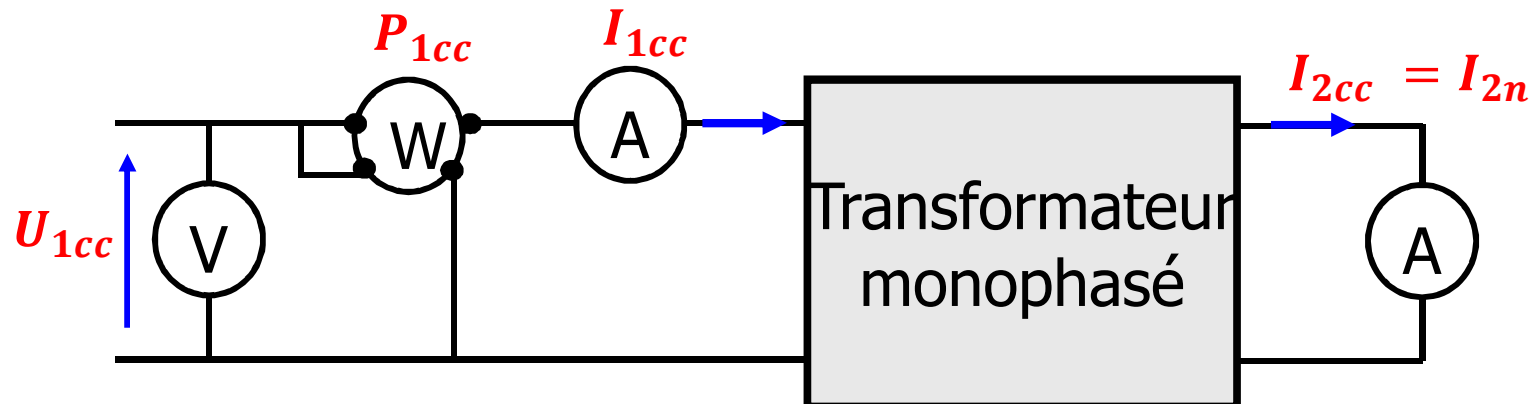
# Transformateur monophasé en régime sinusoïdal

On en déduit:

- Résistance correspondant aux pertes fer (pertes magnétiques ):  $R_f = \frac{U_{1n}^2}{P_{10}}$
- Puissance réactive:  $Q_{10} = \sqrt{(U_{1n}I_{10})^2 - (P_{10})^2}$
- Réactance de magnétisation:  $X_m = L_m\omega = \frac{U_{1n}^2}{Q_{10}}$
- Cet essai permet de déterminer le rapport de transformation:  $m = \frac{U_{20}}{U_{1n}} = \frac{N_2}{N_1}$

## □ Essai en court-circuit sous tension réduite:

Le secondaire est court-circuité ( $U_2 = 0$ ). On alimente le primaire sous tension réduite de court-circuit  $U_{1cc}$  ( $U_{1cc} \approx 4$  à  $8\% U_{1n}$ ), telle que le courant secondaire soit proche du courant secondaire nominal ( $I_{2cc} = I_{2n}$ ). Pour ce faire, on augmente progressivement  $U_1$  en surveillant l'indication de l'ampèremètre connecté au secondaire, de façon à ce que  $I_{2cc} = I_{2n}$  et  $I_{1cc} = I_{1n}$ .



# Transformateur monophasé en régime sinusoïdal

On mesure:

$U_{1cc}$  ;  $I_{1cc}$  ;  $P_{1cc}$  et  $I_{2cc}$

- La puissance active  $P_{1cc}$  mesurée au primaire correspond donc aux pertes fer et aux pertes Joules dissipées dans le primaire et le secondaire:

$$P_{1cc} = P_{fer} + P_J = P_{fer} + (R_1 I_{1cc}^2 + R_2 I_{2cc}^2)$$

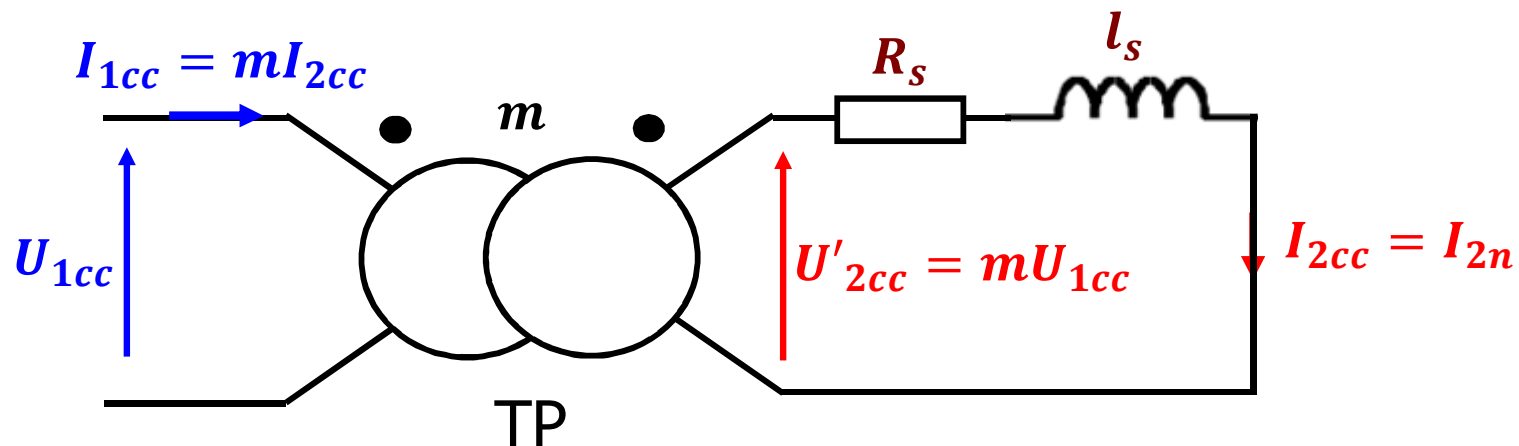
- Les pertes fer sont proportionnelles au carré de la valeur efficace de la tension primaire  $U_1$  à fréquence  $f$  constante:

$$P_{fer} = KB_{max}^2 ; \quad \Phi_{max} = B_{max}S ; \quad U_1 = 4,44fN_1\Phi_{max} \Rightarrow P_{fer} = kU_1^2$$

- À tension primaire réduite  $U_{1cc}$ , les pertes fer sont faibles ainsi que le courant magnétisant  $i_{10}$  dans la branche ( $R_f, L_m$ ). Donc:

$$P_{1cc} = P_J$$

- Le schéma de Kapp du transformateur se réduit à:



# Transformateur monophasé en régime sinusoïdal

- En court circuit, le courant secondaire et le courant primaire sont reliés par:

$$I_{1cc} = mI_{2cc}$$

- Si on considère les impédances ramenées au secondaire, on a:

$$P_{1cc} = R_s I_{2n}^2 = R_1 I_{1n}^2 + R_2 I_{2n}^2 = P_{Jn}$$

## Remarque:

- L'essai en court-circuit s'effectue généralement avec un courant secondaire proche du courant secondaire nominal.
- L'essai en court-circuit d'un transformateur permet de déterminer directement les pertes Joules nominales  $P_{Jn}$ .

On en déduit:

- Résistance totale ramenée au secondaire:

$$R_s = \frac{P_{1cc}}{I_{2cc}^2}$$

- Puissance réactive:

$$Q_{1cc} = \sqrt{(U_{1cc} I_{1cc})^2 - (P_{1cc})^2}$$

- Réactance de fuites ramenée au secondaire:

$$X_s = l_s \omega = \frac{Q_{1cc}}{I_{2cc}^2}$$

# Transformateur monophasé en régime sinusoïdal

## Remarque:

- On peut déterminer  $R_s = R_2 + m^2 R_1$ , il suffit de mesurer  $R_1$  et  $R_2$  en courant continu (il n'y a plus de f.e.m. induite en continu et le transformateur est équivalent à  $R_1$  coté primaire et  $R_2$  coté secondaire).
- On peut déterminer la réactance  $X_s$  en exploitant le digramme de Kapp en court-circuit:
  - ✓ On a:  $\underline{U}'_2 = m \underline{U}_{1cc} = (R_s + jX_s) \underline{I}_{2cc} = \underline{Z}_s \underline{I}_{2cc}$
  - ✓ Puisque:  $\underline{Z}_s = m \underline{U}_{1cc} / \underline{I}_{2cc} = \sqrt{(R_s)^2 + (X_s)^2}$
  - ✓ Alors:  $X_s = \sqrt{\left(\frac{m U_{1cc}}{I_{2cc}}\right)^2 - R_s^2}$

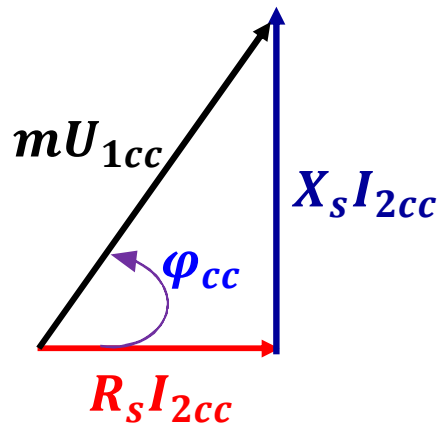
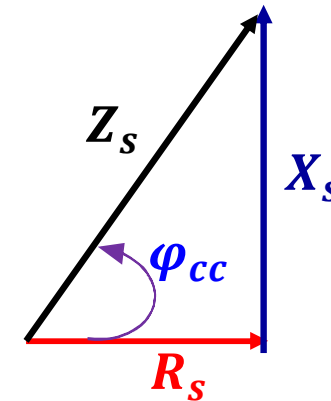


Diagramme de Kapp en court-circuit



Triangle de Kapp en court-circuit

# Transformateur monophasé en régime sinusoïdal

## 4.7. Etude de la chute tension en charge

- A cause des différentes résistances et inductances du modèle, la tension secondaire  $\underline{U}_2$  en charge est différente de la tension secondaire à vide  $\underline{U}_{20}$ .
- On appelle chute de tension secondaire en charge la différence entre les valeurs efficaces de ces tensions :

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

- Numériquement, pour les transformateurs industriels, la chute de tension  $\Delta U_2$  est très faible.

### Diagramme de Kapp

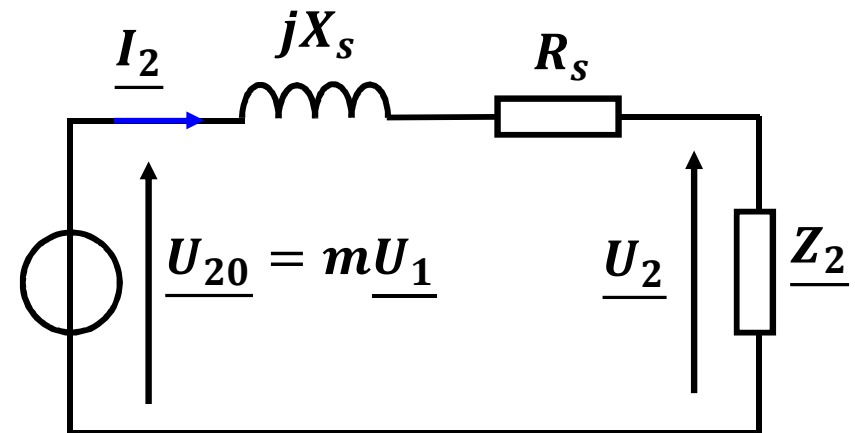
En considérant le schéma équivalent du transformateur réel en charge ramené au secondaire:

- Le primaire est alimenté sous la tension nominale  $\underline{U}_1 = \underline{U}_{1n}$
- La loi des mailles permet d'obtenir l'équation de Kapp en charge:

$$\underline{U}_{20} = m\underline{U}_1 = \underline{U}_2 + (\underline{R}_s + j\underline{X}_s)\underline{I}_2$$

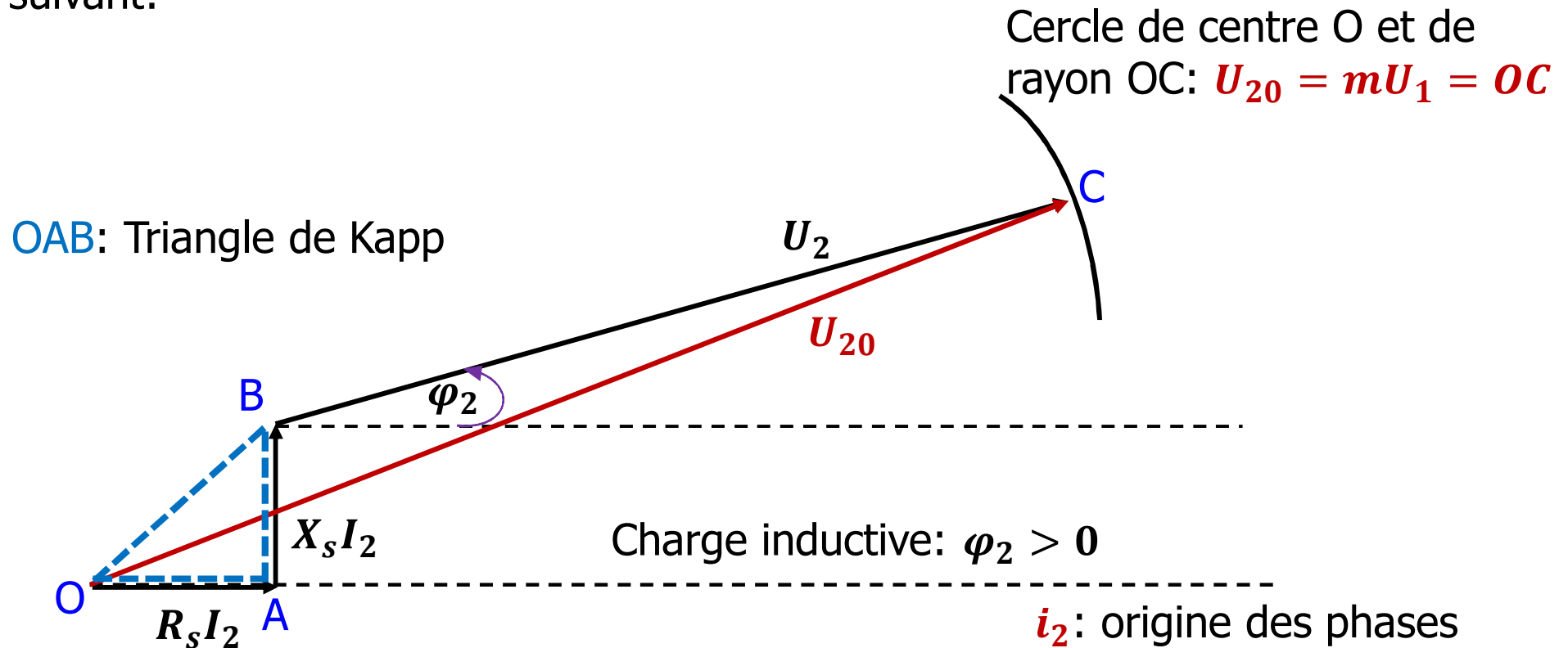
Avec:

$$\underline{U}_2 = \underline{Z}_2 \underline{I}_2 ; \varphi_2 = \arg \underline{Z}_2$$



# Transformateur monophasé en régime sinusoïdal

Si l'on connaît le transformateur par  $U_{20}$ ;  $R_s$  et  $X_s$  et la charge par  $I_2$  et  $\varphi_2$ , on peut déterminer la tension secondaire  $U_2$  par le **diagramme de Kapp** suivant:



En pratique, les dimensions du triangle de Kapp sont faibles (les chutes de tension  $R_s I_2$  et  $X_s I_2$  sont faibles par rapport à  $U_2$ ).

# Transformateur monophasé en régime sinusoïdal

## Formule approchée de la chute de tension secondaire:

On peut confondre le point M avec le point H projection de C:  $\Delta U_2 \approx AH$ .

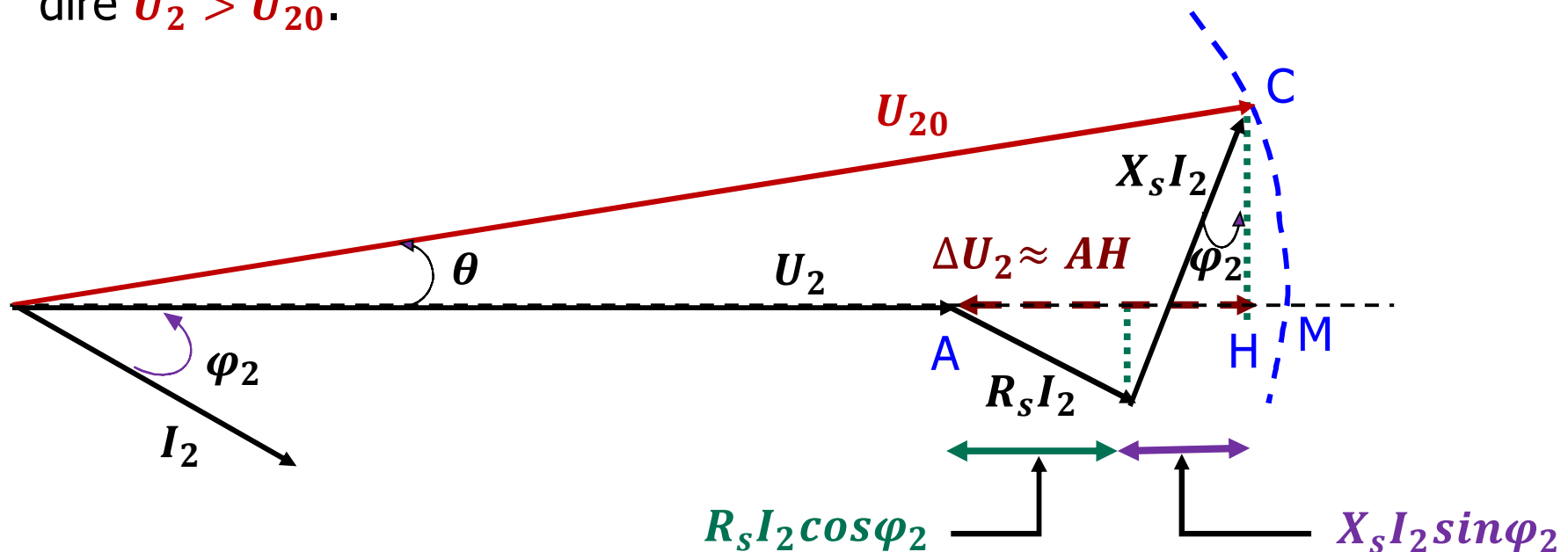
$$\Delta U_2 = U_{20} - U_2 \approx R_s I_2 \cos \varphi_2 + X_s I_2 \sin \varphi_2$$

La chute de tension :

- est proportionnelle au courant  $I_2$  débité.
- dépend de la nature de la charge (déphasage  $\varphi_2$ ).

## Remarque:

- avec une charge capacitive  $\sin \varphi_2$  est négatif, on peut avoir  $\Delta U_2 < 0$  c'est-à-dire  $U_2 > U_{20}$ .



# Transformateur monophasé en régime sinusoïdal

## Grandeurs réduites:

- Dans un contexte industriel, les grandeurs sont données relativement à la tension à vide:

$$\Delta U\% = 100 \frac{U_{20} - U_2}{U_{20}}; \quad R\% = 100 \frac{R_s I_{2n}}{U_{20}}; \quad X\% = 100 \frac{X_s I_{2n}}{U_{20}}$$

Avec:  $R\%$  est la chute ohmique relative et  $X\%$  la chute inductive pour le courant nominal  $I_{2n}$ .

- Chute de tension relative en % :

$$\Delta U\% \approx \frac{I_2}{I_{2n}} (R\% \cos\varphi_2 + X\% \sin\varphi_2)$$

- Elle est de l'ordre de **1 à 6 %** pour  $\cos\varphi_2$  compris entre **1 et 0,8**.
- De même, on définit par  $U_{cc}\%$  le pourcentage de la tension primaire nominale  $U_{1n}$ , donnant en cas de court-circuit le courant nominal ( $I_2 = I_{2n}$ ):

$$U_{cc}\% = 100 \frac{U_{1cc}}{U_{1n}} = 100 \frac{U_{1cc}}{U_{20}/m} = 100 \sqrt{\left(\frac{R_s I_{2n}}{U_{20}}\right)^2 + \left(\frac{X_s I_{2n}}{U_{20}}\right)^2}$$

- Donc:  $U_{cc}\% = \sqrt{R\%^2 + X\%^2}$
- Elle est de l'ordre de **4 à 8**.

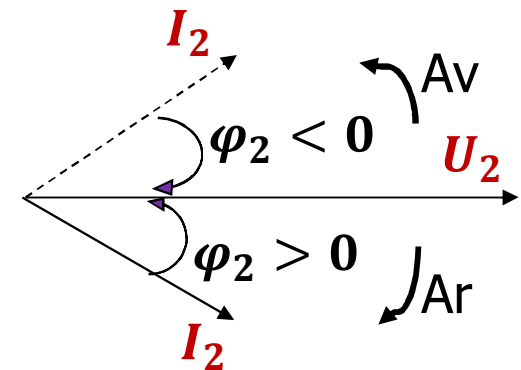
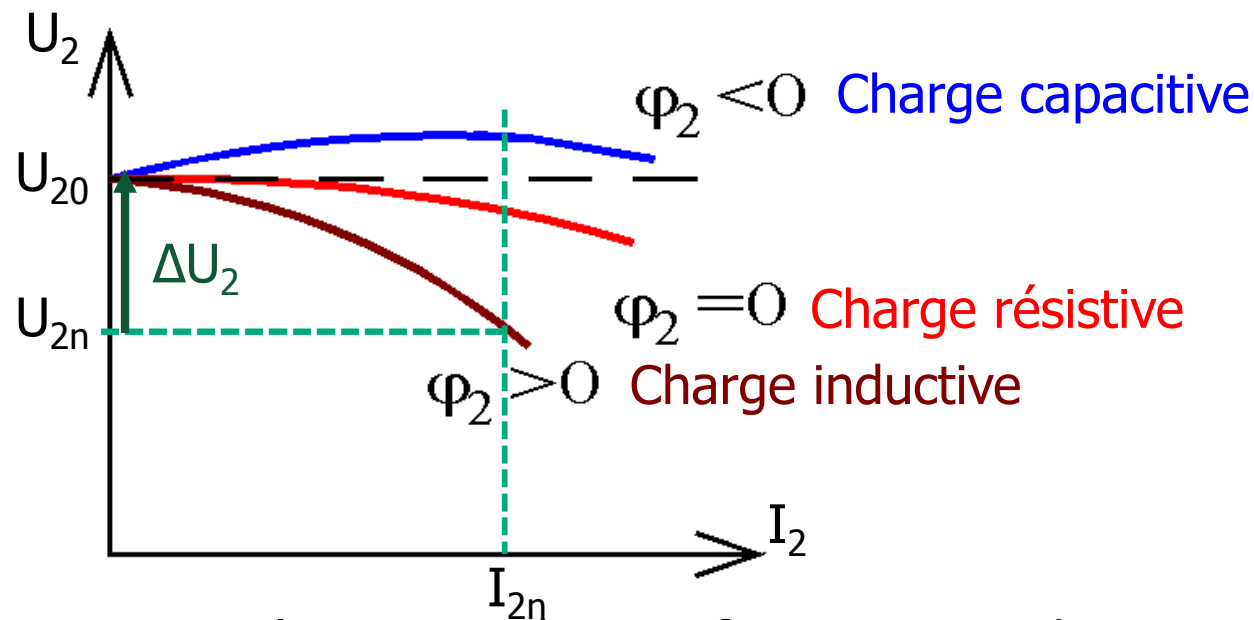
# Transformateur monophasé en régime sinusoïdal

## 4.8. Caractéristiques en charge

C'est la courbe  $U_2 = f(I_2)$  tracée à tension primaire  $U_1$  et facteur de puissance secondaire  $\cos\varphi_2$  constants.

La chute de tension est d'autant plus importante que la charge est **inductive**

Variation de la chute de tension  $\Delta U_2$  en fonction de la nature de la charge alimentée.



**Remarque:** le rapport de transformation en charge  $U_2/U_1$  est différent de celui à vide  $m = N_2/N_1 = U_{20}/U_1$

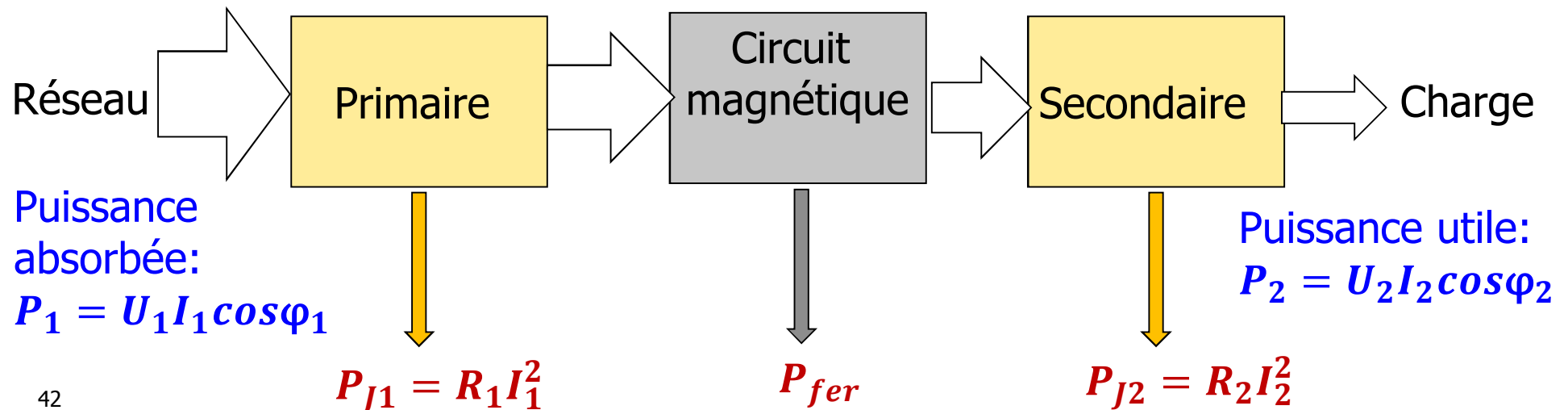
# Transformateur monophasé en régime sinusoïdal

## 4.9. Pertes et rendement du transformateur

### ❑ Perte du transformateur en charge:

- Pertes fer (pertes par hystérésis et par courants de Foucault), elles sont constantes à tension primaire  $U_1$  constante ( $P_f = kU_1^2$ , identiques à tous les régimes de marche industrielle à vide comme en charge, donc indépendantes de la charge). L'essai à vide donne les pertes fer.
- Pertes joules (ou de cuivre) dans les enroulements proportionnelles au carré du courant.
- L'essai en court-circuit ( $I_{2cc} = I_{2n}$ ) donne les pertes joules nominales. Les pertes Joules dépendent de la charge:  $P_J = R_1 I_1^2 + R_2 I_2^2 = R_s I_2^2$

### ❑ Bilan de puissances:



# Transformateur monophasé en régime sinusoïdal

## □ Rendement du transformateur:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + P_J + P_{fer}} = \frac{U_2 I_2 \cos\varphi_2}{U_2 I_2 \cos\varphi_2 + R_s I_2^2 + P_{fer}}$$

Numériquement, ce rendement est très bon pour un transformateur industriel ( $\eta > 95\%$ ). Il dépend de  $U_2$ ,  $I_2$  et  $\cos\varphi_2$ .

On peut déterminer le rendement par deux méthodes:

- **Méthode directe:** on mesure  $P_1$  au primaire et  $P_2$  au secondaire (utilisée pour les petits transformateurs, elle est imprécise pour les transformateurs de puissance élevée, puisque la différence entre  $P_2$  et  $P_1$  est très faible).
- **Méthode indirecte: méthode des pertes séparées** est la plus utilisée, on mesure  $P_2$ ,  $P_J$  et  $P_{fer}$ . (utilisée pour les transformateurs de grande puissance ).

Avec:  $P_{fer} = P_{10}$  et  $P_{Jn} = P_{1cc} = R_s I_{2cc}^2 = R_s I_{2n}^2$  ;  $P_J = R_s I_2^2$

## Remarque: Rendement maximal

Le rendement peut s'écrire:

$$\eta = \frac{U_2 \cos\varphi_2}{U_2 \cos\varphi_2 + R_s I_2 + \frac{P_{fer}}{I_2}}$$

# Transformateur monophasé en régime sinusoïdal

- Pour une charge donnée ( $\cos\varphi_2$  donné), la tension  $U_2$  varie peu avec  $I_2$ .
- le rendement est maximal pour la valeur  $I_2 = I_{2M}$  qui rend minimal le terme:

$$U_2 \cos\varphi_2 + R_s I_2 + P_{fer}/I_2$$

- Le rendement est maximal lorsque les pertes fer sont égales aux pertes joule:

$$R_s I_{2M} = P_{fer}/I_{2M}$$

- Soit encore:

$$P_{fer} = R_s I_2^2 = P_J$$

- Le courant  $I_2$  rendant  $\eta$  maximum:

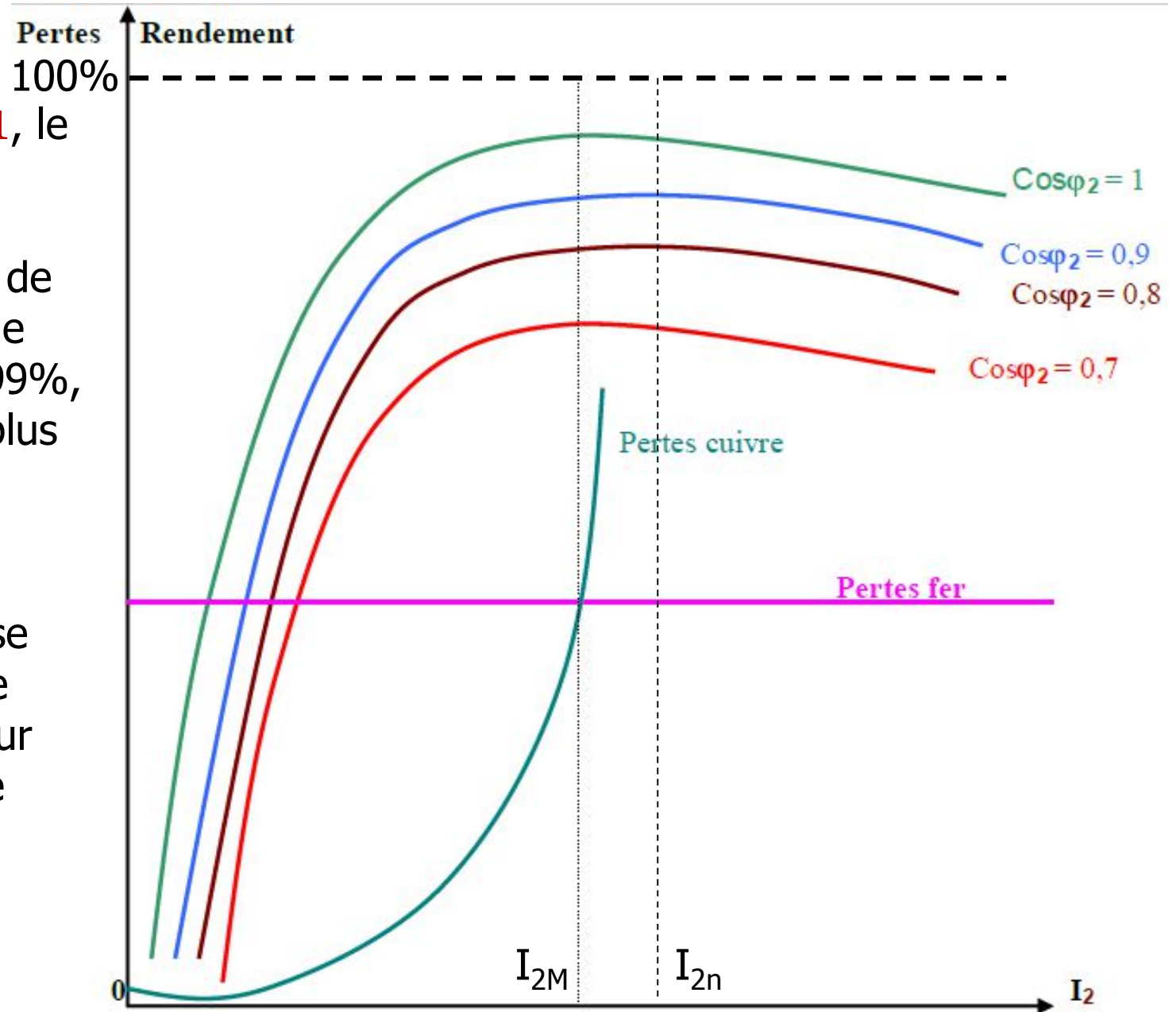
$$I_{2M} = \sqrt{\frac{P_{fer}}{R_s}}$$

- Rendement maximal:

$$\eta_M = \frac{U_2 I_{2M} \cos\varphi_2}{U_2 I_{2M} \cos\varphi_2 + 2P_{fer}}$$

# Transformateur monophasé en régime sinusoïdal

- Pour  $\cos\varphi_2 \approx 1$ , le rendement maximum d'un transformateur de puissance est de l'ordre 95% à 99%, il est d'autant plus grand que la puissance est importante.
- Le rendement se maintient à une valeur élevée sur une large plage d'utilisation.
- Il diminue avec  $\cos\varphi_2$



# Transformateur monophasé en régime sinusoïdal

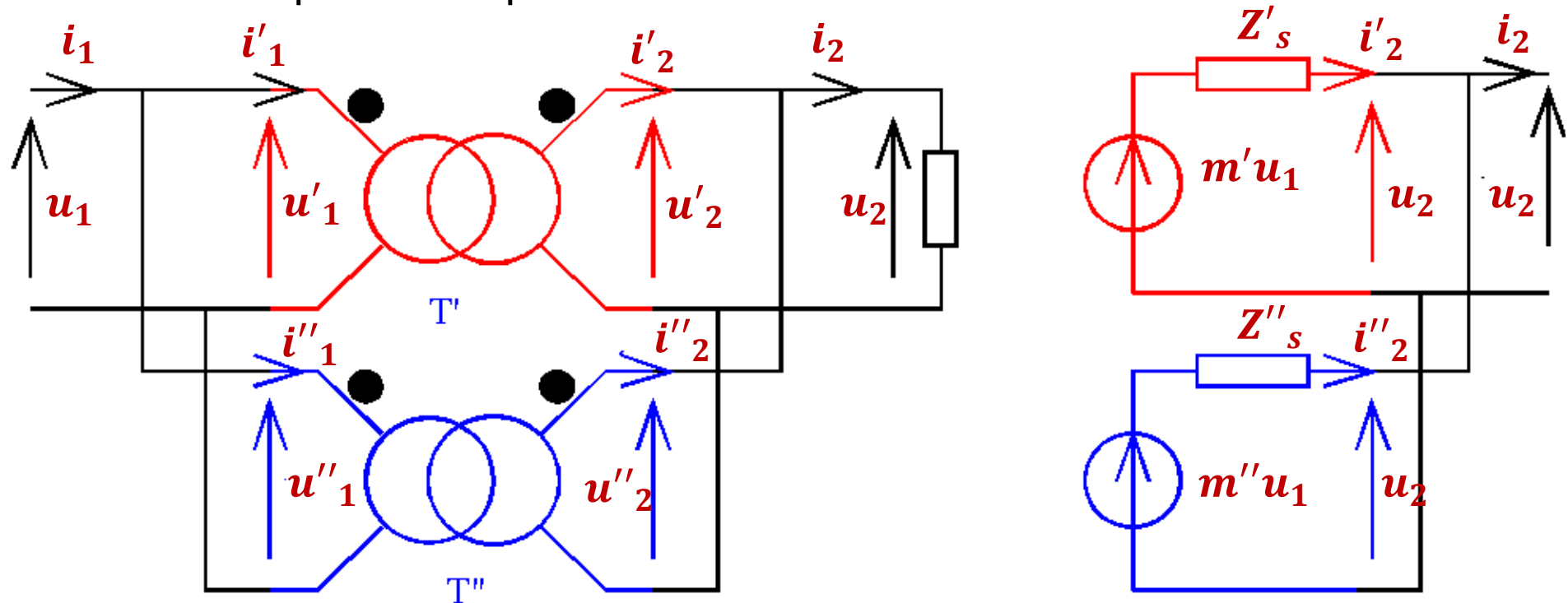
## 5. Mise en parallèles des transformateurs

- Si la puissance demandée au secondaire d'un transformateur est trop importante. Les intensités primaire et secondaire ayant alors des valeurs excessives provoquent :
  - ✓ un échauffement anormal des bobines,
  - ✓ une chute de tension secondaire exagérée.
- Pour remédier à ces inconvénients, il est possible de coupler un autre transformateur, en parallèle avec le précédent. c'est à dire que les primaires d'une part et les secondaires d'autre part sont couplés en parallèle.
- La charge est maintenant répartie sur les deux transformateurs ; les récepteurs sont alimentés sous une tension normale.
- Ce mode d'alimentation permet également d'assurer une continuité de service en cas de défaillance d'un des transformateurs et facilite la maintenance.
- La figure suivante représente le couplage en parallèle de deux transformateurs et le schéma équivalent au montage, vu de la charge.
- Les primaires sont alimentés par le réseau de tension  $u_1 = u'_1 = u''_1$ ; la charge est alimentée sous la tension  $u_2 = u'_2 = u''_2$ ; elle absorbe le courant  $i_2 = i'_2 + i''_2$  avec le facteur de puissance  $\cos\varphi_2$ .

# Transformateur monophasé en régime sinusoïdal

## 5.1. Conditions de couplage

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



Impédances internes totales ramenées au secondaire des deux transformateurs:

$$\underline{Z}'_s = R'_s + jX'_s$$
$$\underline{Z}''_s = R''_s + jX''_s$$

# Transformateur monophasé en régime sinusoïdal

## a. Même tension nominale primaire:

- Les deux primaires étant branchés sous la même source de tension.

## b. Même rapport de transformation :

Les f.e.m doivent être égales (tensions secondaires à vide identiques) afin d'éviter tout courant de circulation à vide (débit d'une bobine dans l'autre).

- À vide, il ne circule aucun courant dans les impédances internes  $Z'_s$  et  $Z''_s$ ; donc:  $m' \underline{U}_1 = m'' \underline{U}_1$ ;  $\underline{U}'_{20} = \underline{U}''_{20} \Rightarrow m' = m''$
- Les deux f.é.m doivent être en phase; pour cela nous devons coupler les bornes homologues.

## Remarque:

Pour vérifier ces conditions, nous couplons les primaires et nous relierons une borne secondaire de T' avec une de T''; nous mesurons la tension entre les deux autres bornes; cette tension doit être nulle ou négligeable devant la tension secondaire. Si c'est le cas nous pouvons relier les deux bornes secondaires; sinon il faut permuter les bornes primaires d'un des transformateurs.

## c. 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 %.

# Transformateur monophasé en régime sinusoïdal

## 5.2. Répartition de la charge

Soit deux transformateurs de même rapport de transformation et même f.é.m secondaire

On a:

$$\left. \begin{array}{l} \underline{U}_2 = \underline{U}_{20} - \underline{Z}'_s \underline{I}'_2 \\ \underline{U}_2 = \underline{U}_{20} - \underline{Z}''_s \underline{I}''_2 \end{array} \right\} \Rightarrow \underline{Z}'_s \underline{I}'_2 = \underline{Z}''_s \underline{I}''_2$$

- L'égalité des tensions secondaires implique l'égalité des chutes de tensions:

$$\underline{Z}'_s \underline{I}'_2 = \underline{Z}''_s \underline{I}''_2$$

- Les courants se répartissent proportionnellement aux impédances internes  $\underline{Z}'_s$  et  $\underline{Z}''_s$  des deux transformateurs.
- La loi des nœuds, donne:

$$\underline{I}_2 = \underline{I}'_2 + \underline{I}''_2$$

- Les courants des deux transformateurs sont:

$$\underline{I}'_2 = \frac{\underline{Z}''_s}{\underline{Z}'_s + \underline{Z}''_s} \cdot \underline{I}_2$$

$$\underline{I}''_2 = \frac{\underline{Z}'_s}{\underline{Z}'_s + \underline{Z}''_s} \cdot \underline{I}_2$$

# Transformateur monophasé en régime sinusoïdal

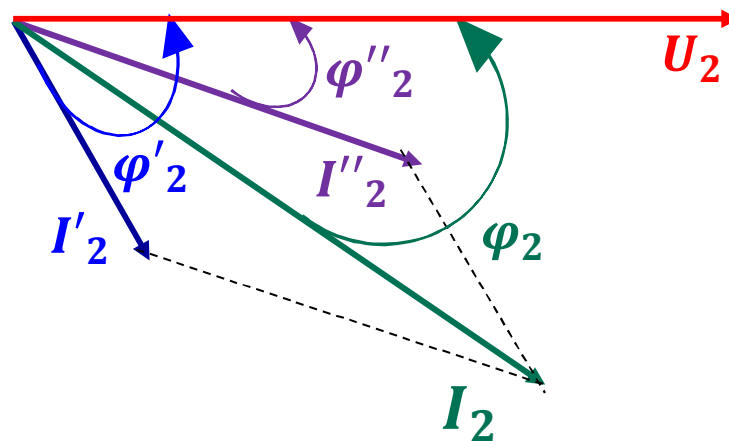
On prenant la tension secondaire  $u_2$  comme origine des phases:

- Les transformateurs couplés en parallèle alimentent une charge de facteur de puissance  $\cos\varphi_2$ .
- Facteur de puissance secondaire du transformateur T',  $\cos\varphi'_2$ :

$$\begin{aligned}\varphi'_2 &= \arg(\underline{U}_2) - \arg(\underline{I}'_2) = \\ \varphi'_2 &= \arg(\underline{U}_2) - \arg(\underline{I}_2) - \arg(\underline{Z}''_s) + \arg(\underline{Z}'_s + \underline{Z}''_s) \\ \varphi'_2 &= \varphi_2 - \arctan\left(\frac{X''_s}{R''_s}\right) + \arctan\left(\frac{X'_s + X''_s}{R'_s + R''_s}\right)\end{aligned}$$

- De même le facteur de puissance secondaire du transformateur T'',  $\cos\varphi''_2$ :

$$\varphi''_2 = \varphi_2 - \arctan\left(\frac{X'_s}{R'_s}\right) + \arctan\left(\frac{X'_s + X''_s}{R'_s + R''_s}\right)$$



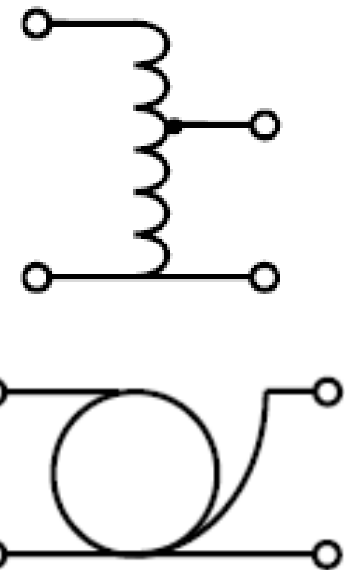
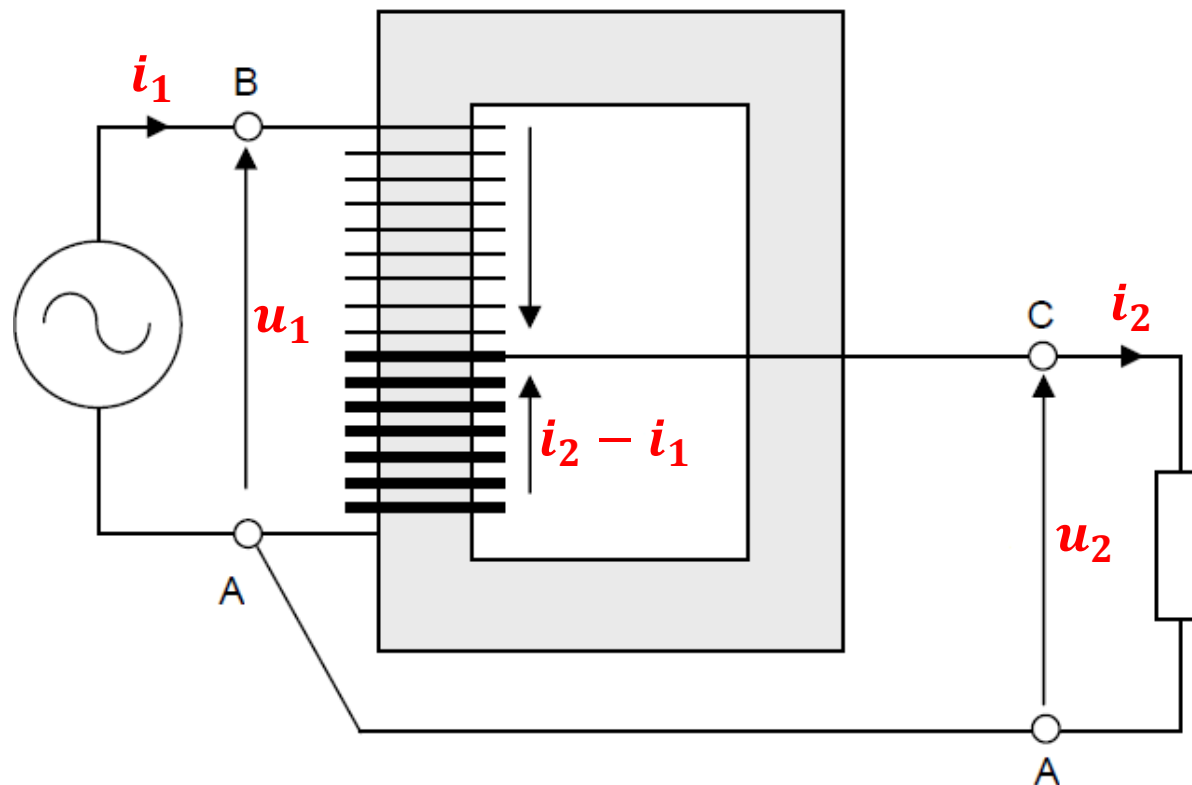
# Transformateur monophasé en régime sinusoïdal

## 6. Transformateurs spéciaux

Dans les applications industrielles, on rencontre un grand nombre de transformateurs de construction spéciale.

### 6.1. Autotransformateur:

- Composé d'un seul enroulement de  $N_1$  spires monté sur un circuit magnétique et une prise sur cet enroulement pour  $N_2$  spires.



Symbole d'un autotransformateur

# Transformateur monophasé en régime sinusoïdal

- Rapport de transformation (limité entre 2 et 1/2 en pratique) et schéma équivalent identique à celui du transformateur.
- **Avantages:** dus à l'économie d'un enroulement il est plus petit; moins cher; plus efficace, pertes joule réduits, son rendement est plus élevé.
- **Inconvénient:** pas d'isolation galvanique entre primaire et secondaire.

## Remarque:

- Il existe des transformateurs à rapport variable (contact glissant).
- Les autotransformateurs servent au démarrage à tension réduite des moteurs, à la régulation de la tension des lignes de distribution et, en général, à la transformation de tensions de valeurs assez rapprochées.



autotransformateurs à rapport variable

# Transformateur monophasé en régime sinusoïdal

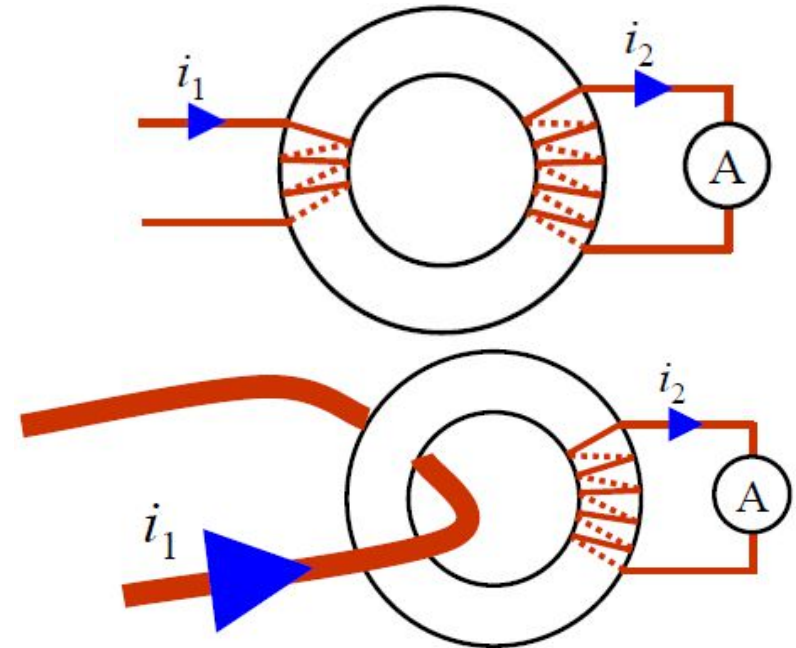
## 6.2. Transformateur de mesure de courant

**Utilisé comme ampèremètre:** pour ramener à une valeur facilement mesurable des courants sur les lignes à haute tension pour des raisons de sécurité.

- Le primaire est inséré en série dans un circuit;
- Si le transformateur est parfait  $i_2 = i_1/m$ . Généralement,  $m = 5 ; 10 ; 50 ; 100 ; \dots ; 1000$  et  $I_2$  compris entre 1 et 5 A.
- Le primaire est souvent formé d'une seule spire.

### Remarque:

On ne doit jamais ouvrir le secondaire lorsque le primaire est alimenté. le secondaire est en court-circuit (la tension induite au secondaire ouvert peut atteindre des valeurs assez élevées pour provoquer des chocs électriques dangereux).

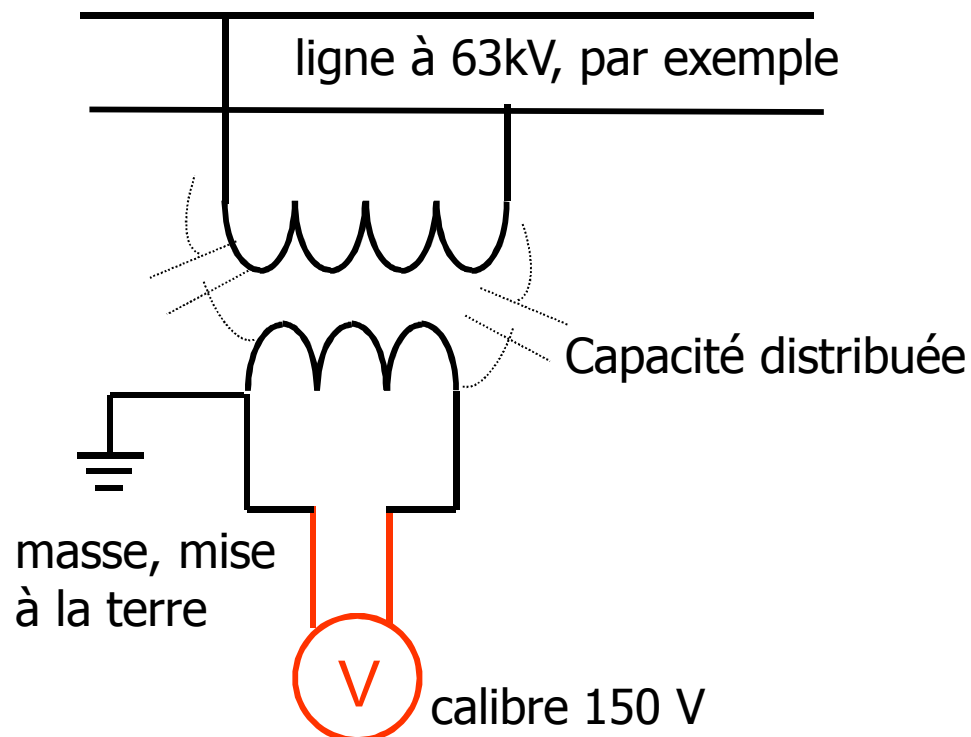


# Transformateur monophasé en régime sinusoïdal

## 6.2. Transformateur de mesure de tension

**Utilisé comme voltmètre:** pour la mesure de fortes tensions électriques. Il sert à faire l'adaptation entre la tension élevée d'un réseau électrique haute tension et l'appareil de mesure (voltmètre, ou wattmètre par exemple).

- Le primaire des transformateurs de tension est branché en parallèle sur les lignes à haute tension dont on veut connaître la tension.



# Transformateur monophasé en régime sinusoïdal

## TD: Etude d'un transformateur

Un transformateur monophasé porte sur sa plaque signalétique :

**15kV/220V - 50Hz - 120kVA**

### 1) Analyse de la plaque signalétique

- Calculer le courant nominal au primaire et au secondaire,
- Quelle est la puissance active nominale pour une charge de facteur de puissance 0,5 ?

### 2) L'essai à vide a donné :

**$U_{10} = 15kV$  ;  $U_{20} = 226V$  ;  $I_{10} = 0,24A$  ;  $P_{10} = 1,43kW$**

- Calculer le rapport de transformation  $m$ ,
- Calculer les composants  $R_f$  et  $L_m$  modélisant le circuit magnétique,
- La section du circuit magnétique étant  $S = 116cm^2$  et l'induction maximale étant  $B_{max} = 1,3T$ , calculer les nombres de spires au primaire et au secondaire.

### 3) L'essai en court-circuit a donné :

**$U_{1cc} = 2,98kV$  ;  $I_{1cc} = 8A$  ;  $P_{1cc} = 1,82kW$**

- Calculer la résistance et l'inductance de fuites totales ramenées au secondaire.

## Transformateur monophasé en régime sinusoïdal

- b) Calculer la résistance du secondaire sachant que celle du primaire est  $R_1 = 16\Omega$ .
  - c) Quel serait le courant primaire en court-circuit pour une alimentation sous tension nominale?
- 4) Le transformateur alimenté sous tension nominale débite sur une charge consommant  $I_2 = 200A$  avec un facteur de puissance 0,7AV**
- a) Calculer la tension secondaire,
  - b) Calculer le rendement du transformateur,
  - c) Calculer le courant primaire.