



# Electrotechnique

## Chapitre 4 Transformateur en régime sinusoïdal

© Fabrice Sincère ; version 4.0.2

<http://pagesperso-orange.fr/fabrice.sincere/>

# Sommaire

- 1- Introduction
- 2- Le transformateur parfait
- 3- Transformateur réel
- 4- Schéma équivalent du transformateur réel
- 5- Chute de tension en charge
- 6- Bilan de puissance
- 7- Transformateur triphasé

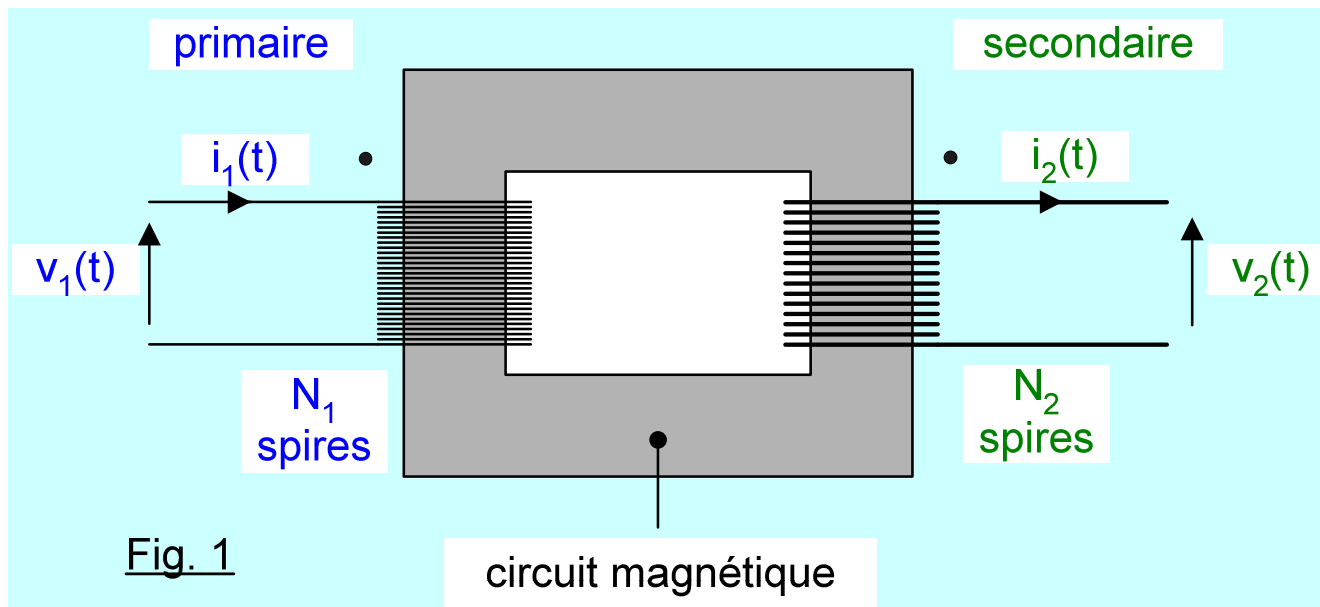
# Chapitre 4

## Transformateur en régime sinusoïdal

### 1- Introduction

- Constitution

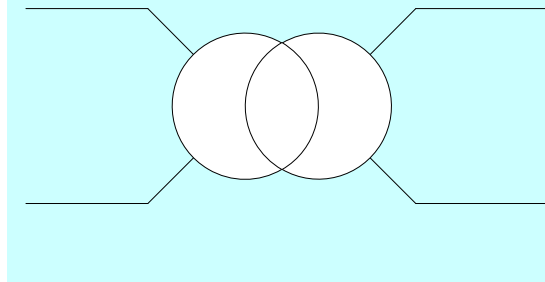
Le transformateur monophasé est constitué de deux enroulements indépendants qui enlacent un circuit magnétique commun :



Lucien GAULARD  
(1850 - 1888)

- Symbole électrique

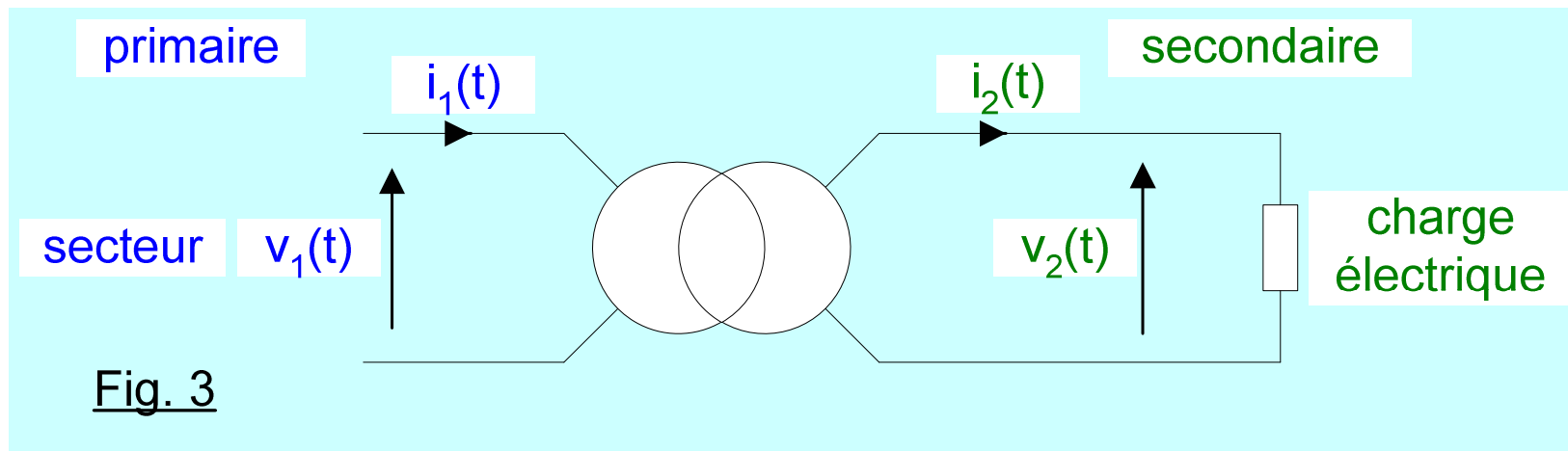
Fig. 2



- Branchement

L'enroulement *primaire* est branché à une source de tension sinusoïdale alternative.

L'enroulement *secondaire* alimente une charge électrique :



## 2- Le transformateur parfait

- Le transformateur utilise le phénomène d'induction électromagnétique.

Loi de Faraday :

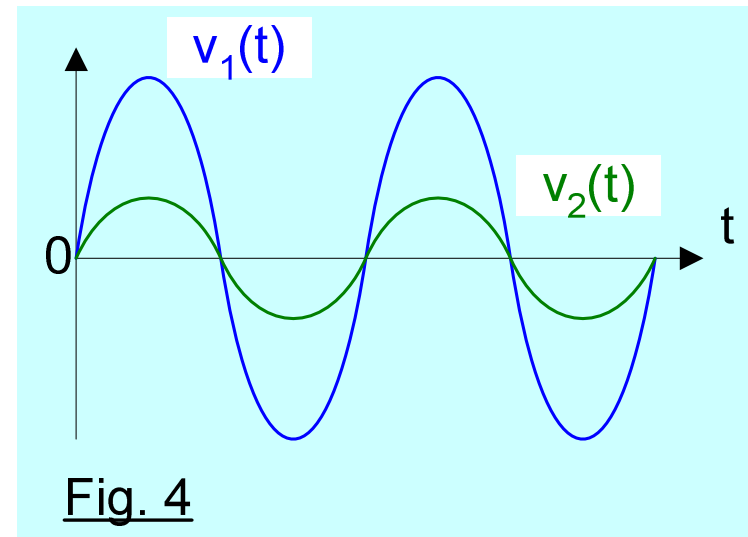
$$v_1(t) = -e_1(t) = +N_1 \frac{d\Phi}{dt}$$

$\Phi(t)$  est le flux magnétique canalisé par le circuit magnétique.

Au secondaire :

$$v_2(t) = e_2(t) = +N_2 \frac{d\Phi}{dt}$$

D'où : 
$$v_2(t) = \frac{N_2}{N_1} v_1(t)$$



- Relation entre les valeurs efficaces : 
$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{N_2}{N_1}$$

- Bilan de puissance du transformateur parfait

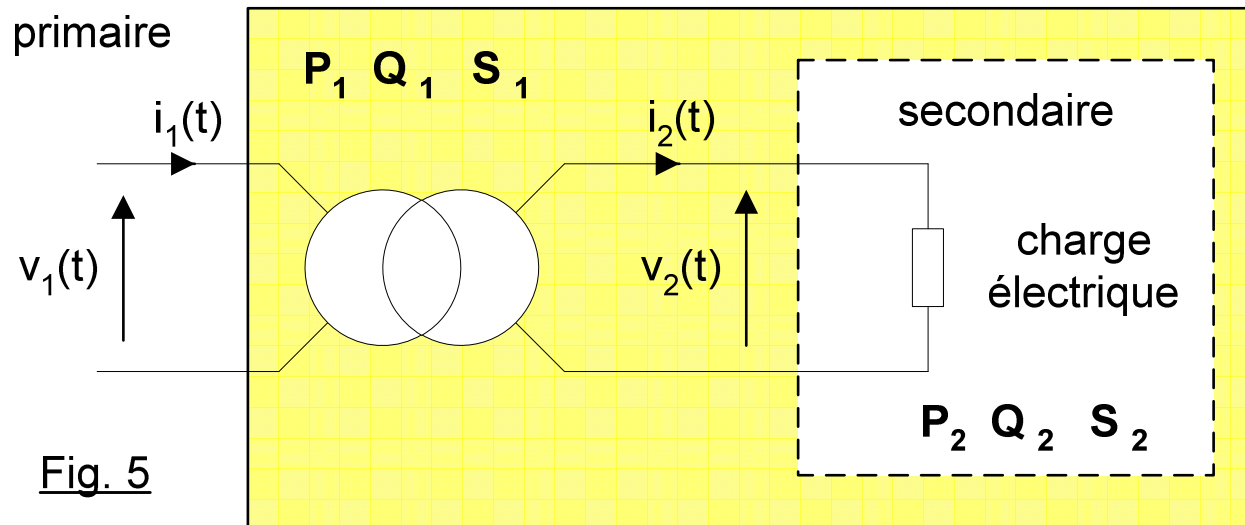


Fig. 5

- pas de pertes :  $P_2 = P_1$  (rendement de 100 %)
- circuit magnétique parfait :  $Q_2 = Q_1$

Par conséquent :

$$S_2 = S_1$$

$$V_2 I_2 = V_1 I_1$$

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

Facteur de puissance :  $\cos \varphi_2 = \cos \varphi_1$

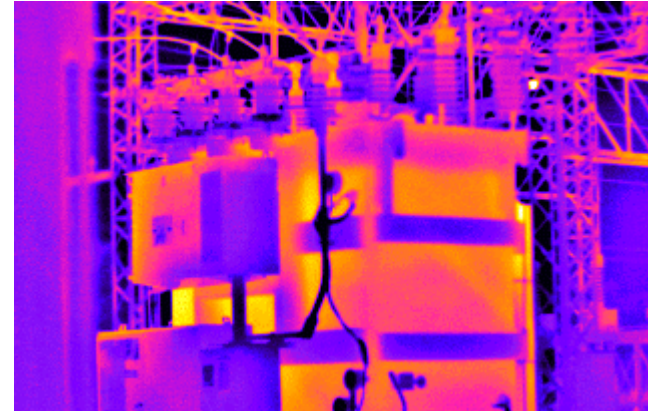
C'est la charge du secondaire qui impose le facteur de puissance.

Ex. :  $\cos \varphi_2 = 1$  pour une charge résistive.

### 3- Transformateur réel

En réalité :

- $P_2 < P_1$  : rendement  $< 1$  car :
  - pertes Joule dans les enroulements
  - pertes fer dans le circuit magnétique
  - vibrations
- La magnétisation du circuit magnétique demande un peu de puissance réactive :  $Q_2 < Q_1$
- A vide (pas de charge au secondaire :  $I_2 = 0$ ) :  $I_{1v} \neq 0$
- $V_2$  dépend du courant  $I_2$  débité dans la charge.



- Définition

Rapport de transformation à vide :

$$m_v = \frac{V_{2\text{vide}}}{V_1}$$

En pratique :  $m_v = \frac{V_{2\text{vide}}}{V_1} \approx \frac{N_2}{N_1}$

Par la suite, on suppose que :

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



• Deux grands types de transformateurs :

- élévateur de tension (abaisseur de courant) :  $m_v > 1$        $N_2 > N_1$

- abaisseur de tension (élévateur de courant) :  $m_v < 1$        $N_2 < N_1$

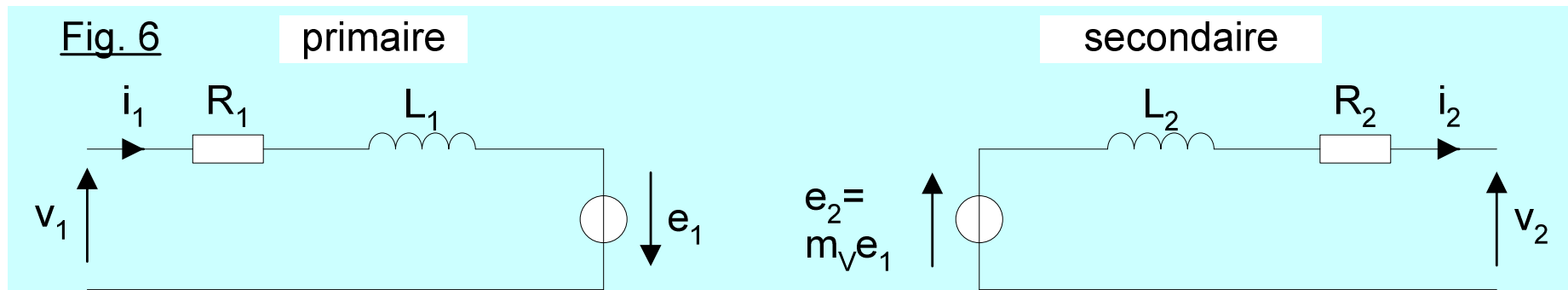


L'enroulement de petite section est relié à la haute tension.

## 4- Schéma équivalent du transformateur réel

On utilise l'hypothèse de Kapp, c'est à dire :

- transformateur parfait pour les courants :  $\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1}$
- pas de pertes fer



$R_1$  : résistance de l'enroulement primaire

$R_2$  : “ “ “ secondaire

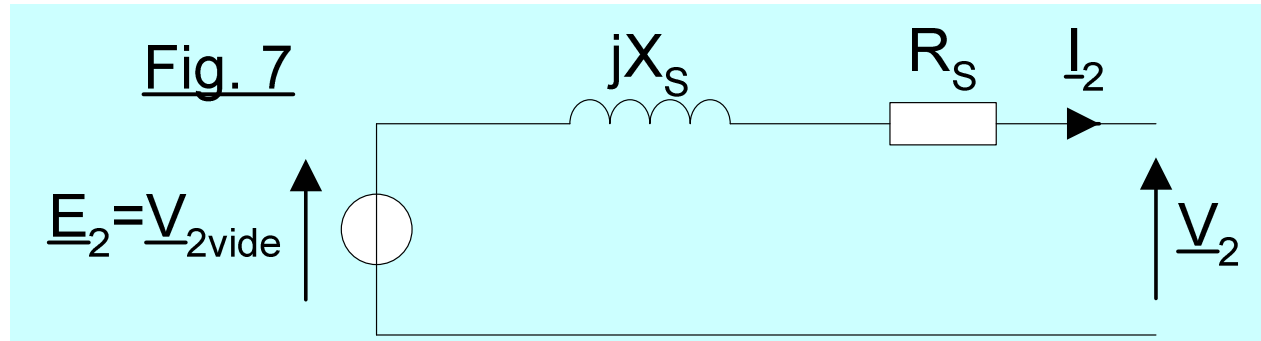
$L_1$  : inductance des fuites magnétiques au primaire

$L_2$  : “ “ “ “ “ secondaire

- Schéma équivalent vu du secondaire

On peut résumer les deux schémas précédents en un seul.

Avec la notation complexe :



$R_s$  : résistance des enroulements ramenée au secondaire

$L_s$  : inductance de fuite ramenée au secondaire

$X_s = L_s \omega$  : réactance de fuite “ “

On montre que :

$$R_s = R_2 + m_v^2 R_1$$

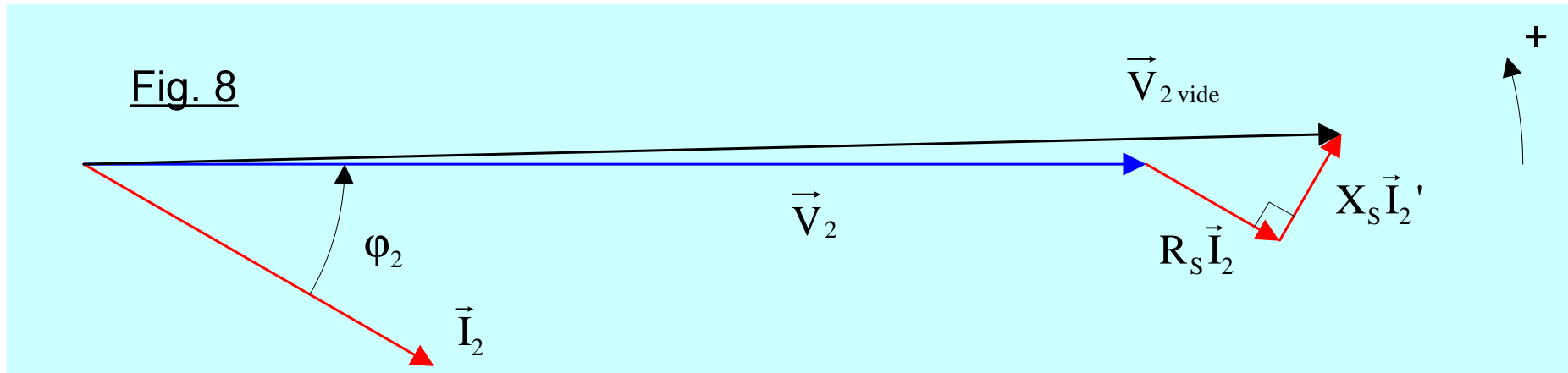
$$L_s = L_2 + m_v^2 L_1$$

Loi des branches :

$$\underline{V}_2 = \underline{V}_{2\text{vide}} - (R_s + jX_s) \underline{I}_2$$

- Diagramme de Kapp

C'est la représentation de Fresnel du schéma équivalent vu du secondaire :



$$\vec{V}_2 = \vec{V}_{2\text{vide}} - (R_s \vec{I}_2 + X_s \vec{I}_2')$$

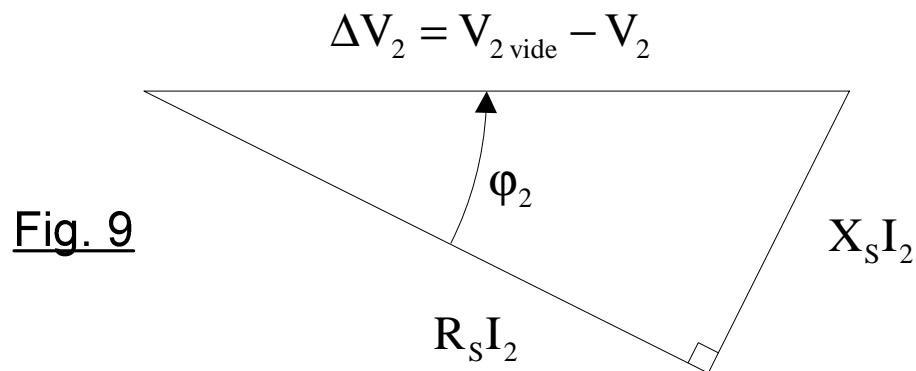
## 5- Chute de tension en charge

Par définition, la chute de tension en charge au secondaire est :

$$\Delta V_2 = V_{2\text{vide}} - V_2$$

En pratique :  $R_s I_2$  et  $X_s I_2 \ll V_2$ .

On peut faire l'approximation suivante :

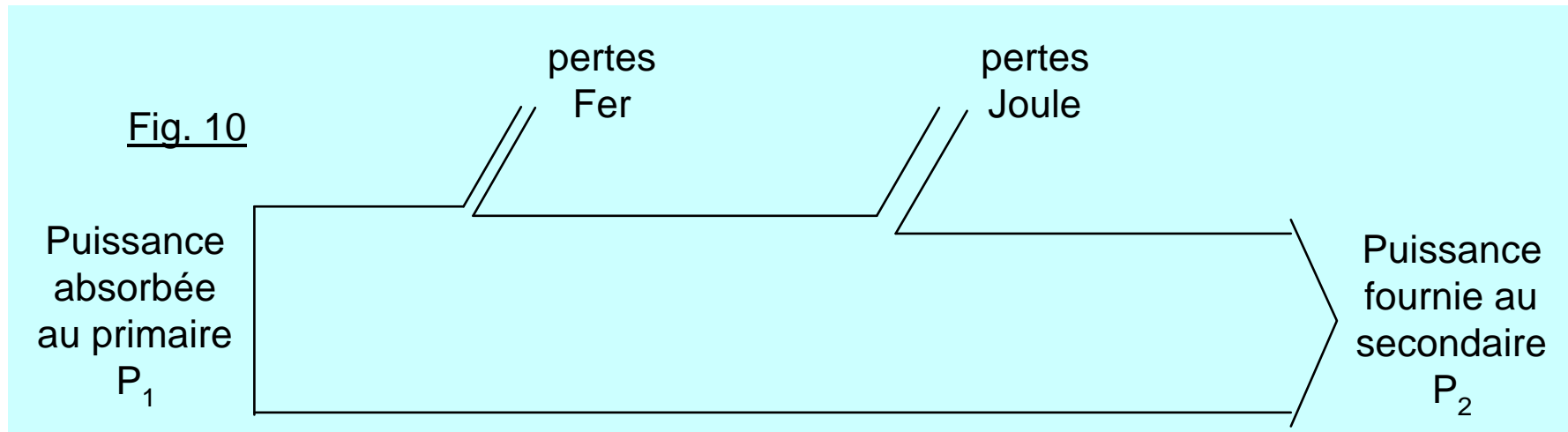


$$\Delta V_2 \approx (R_s \cos \varphi_2 + X_s \sin \varphi_2) I_2$$

La chute de tension :

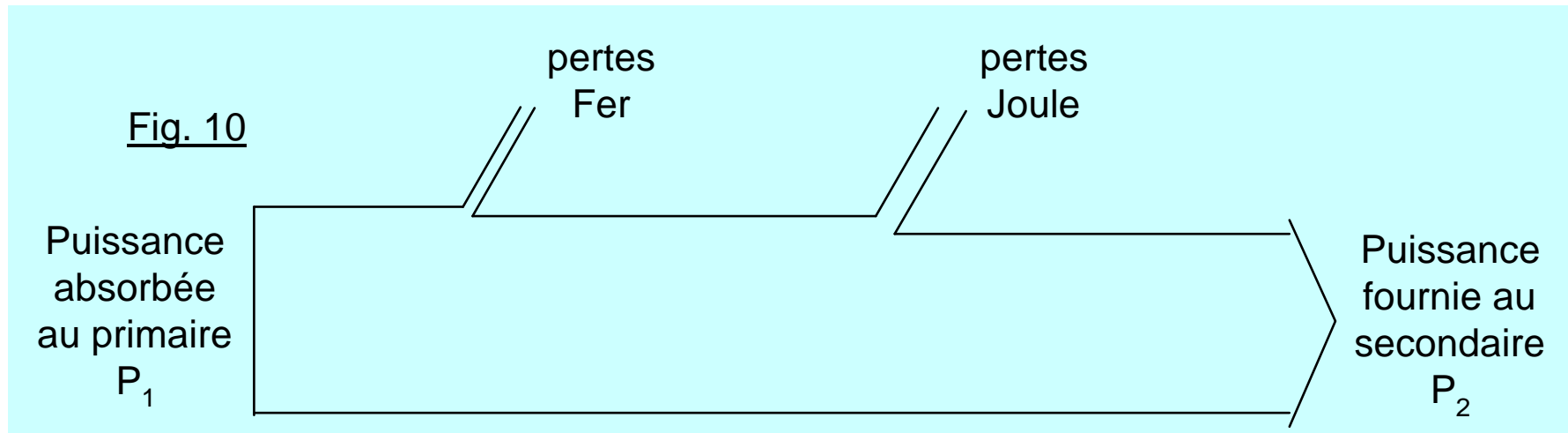
- est proportionnelle au courant débité
- dépend de la nature de la charge (facteur de puissance)

## 6- Bilan de puissance



$P_1$  et  $P_2$  sont des puissances électriques :

- $P_1 = V_1 I_1 \cos \varphi_1$
- $P_2 = V_2 I_2 \cos \varphi_2$



Les pertes ont deux origines :

- électrique

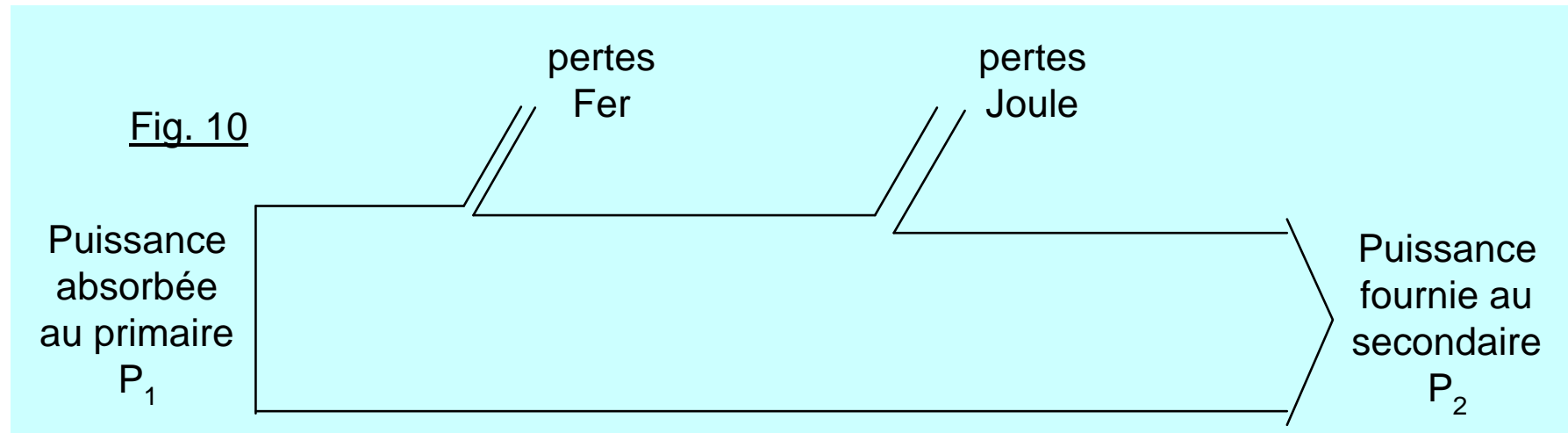
Les pertes Joule (ou pertes *cuivre*) dans les enroulements :

$$p_{\text{Joule}} = R_1 I_1^2 + R_2 I_2^2 = R_s I_2^2$$

- magnétique

Les pertes fer dans le circuit magnétique dépendent de la tension d'alimentation :

$$p_{\text{fer}} \propto V_1^2$$



- Rendement

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{V_2 I_2 \cos \varphi_2}{V_2 I_2 \cos \varphi_2 + R_s I_2^2 + p_{\text{fer}}}$$



## 7- Transformateur triphasé

Trois enroulements au primaire (un par phase).

« « secondaire «

- Rendement

$$\eta = \frac{\sqrt{3}U_2 I_2 \cos \varphi_2}{\sqrt{3}U_2 I_2 \cos \varphi_2 + 3R_s I_2^2 + p_{\text{fer}}}$$

- Application : transport et distribution de l'énergie électrique

a) Production : 20 kV (50 Hz)

b) Transport :

20 kV / 400 kV (transfo. élévateur)

400 kV / 225 kV / 90 kV / 63 kV (transfos. abaisseurs)

c) Distribution :

63 kV / 20 kV / 400 V

- Tableau 1

UTE C18-150 :

HTB	> 50 kV
HTA	1 à 50 kV
BTB	500 à 1000 V
BTA	50 à 500 V