

# **Cours de Physique appliquée**

## **Le transformateur monophasé en régime sinusoïdal (50 Hz)**

**Terminale STI Génie Electrotechnique**

**© Fabrice Sincère ; version 1.0.6**

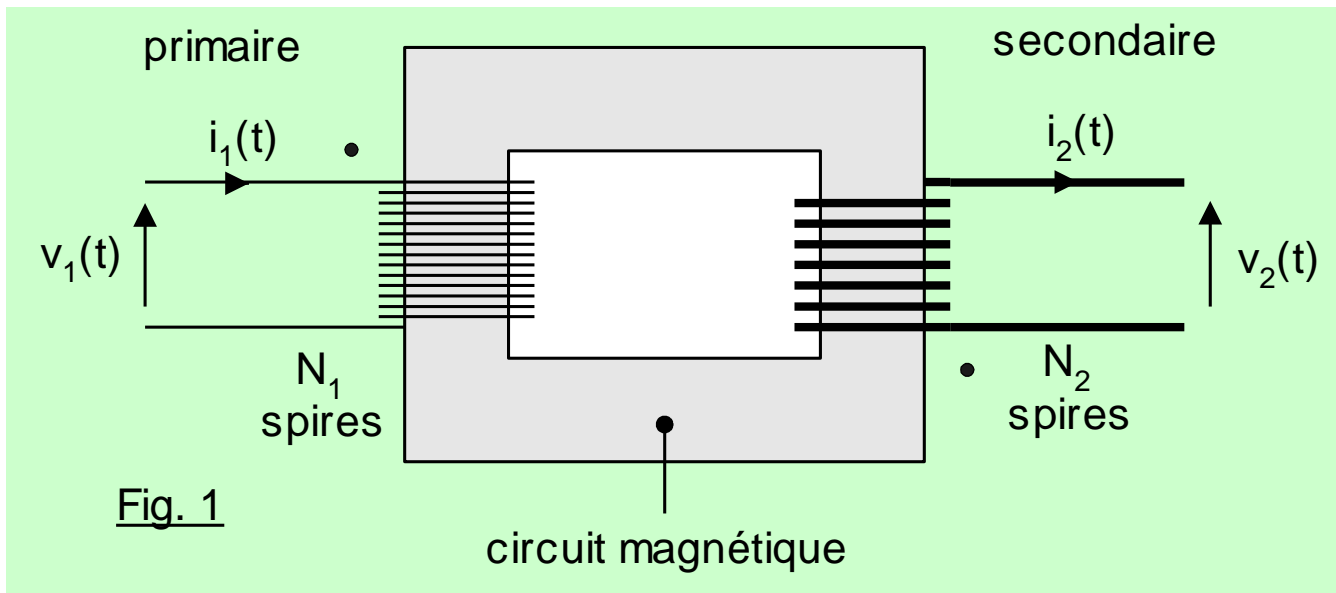
# Sommaire

- 1- Introduction
- 2- Le transformateur parfait
- 3- Le transformateur réel
- 4- Bilan de puissances
- 5- Essais d'un transformateur
- 6- Modèle de Thévenin ramené au secondaire
- 7- Rôle des transformateurs dans le transport et la distribution de l'énergie électrique

# 1- Introduction

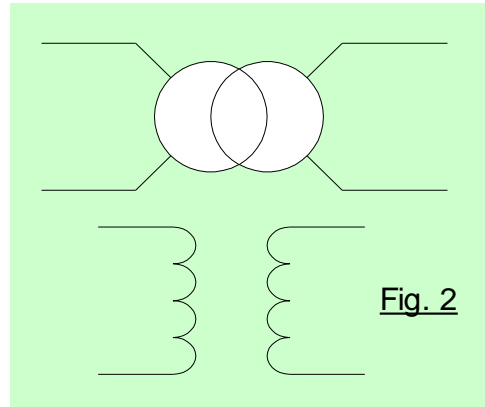
- Constitution

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



**Lucien GAULARD**  
(1850 - 1888)

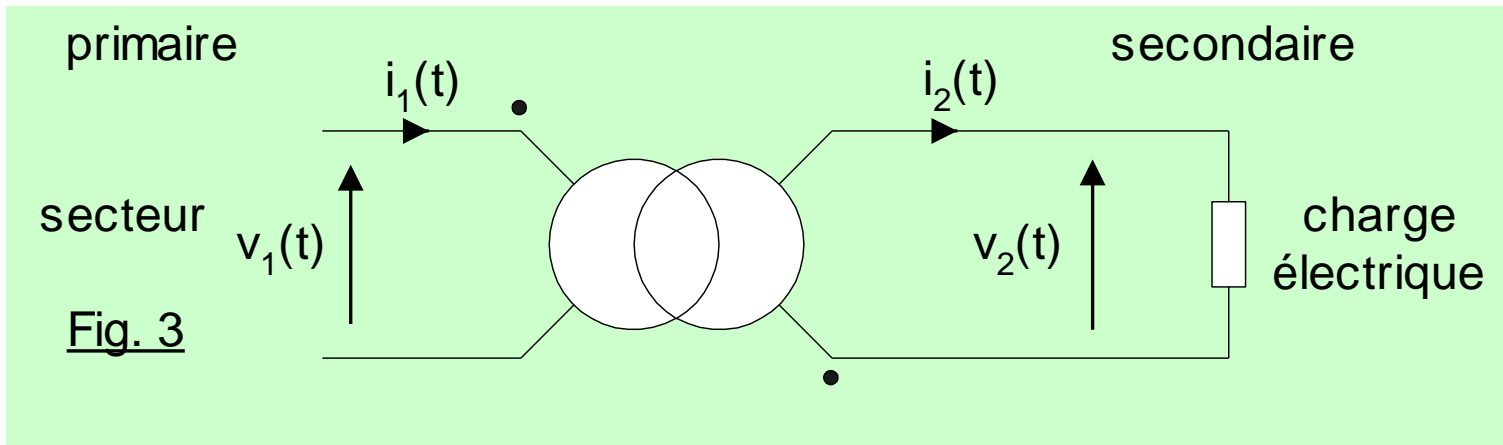
- Symbole électrique



- 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 :

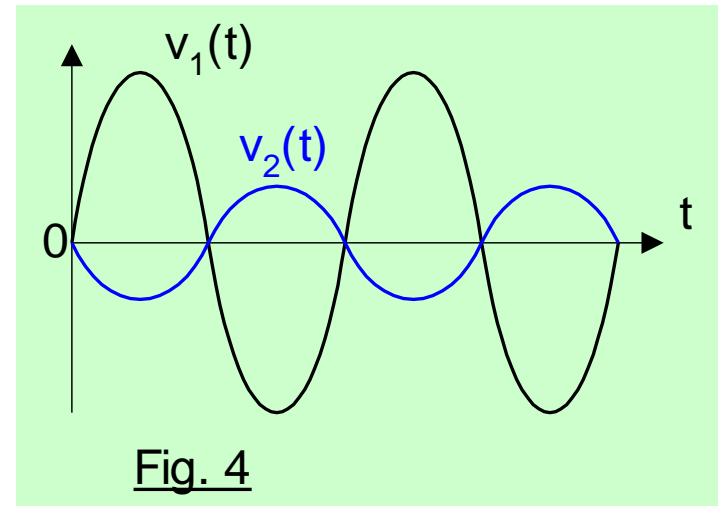
$$v_1(t) = -e_1(t) = +N_1 \frac{d\Phi}{dt}$$

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

Au secondaire :

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

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



- Relation entre les valeurs efficaces :

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

- Formule de Boucherot

$$E_1 = 4,44 \cdot N_1 \cdot \hat{\Phi} \cdot f$$

$$E_2 = 4,44 \cdot N_2 \cdot \hat{\Phi} \cdot f$$

$$\text{avec: } \hat{\Phi} = \hat{B} \cdot S$$

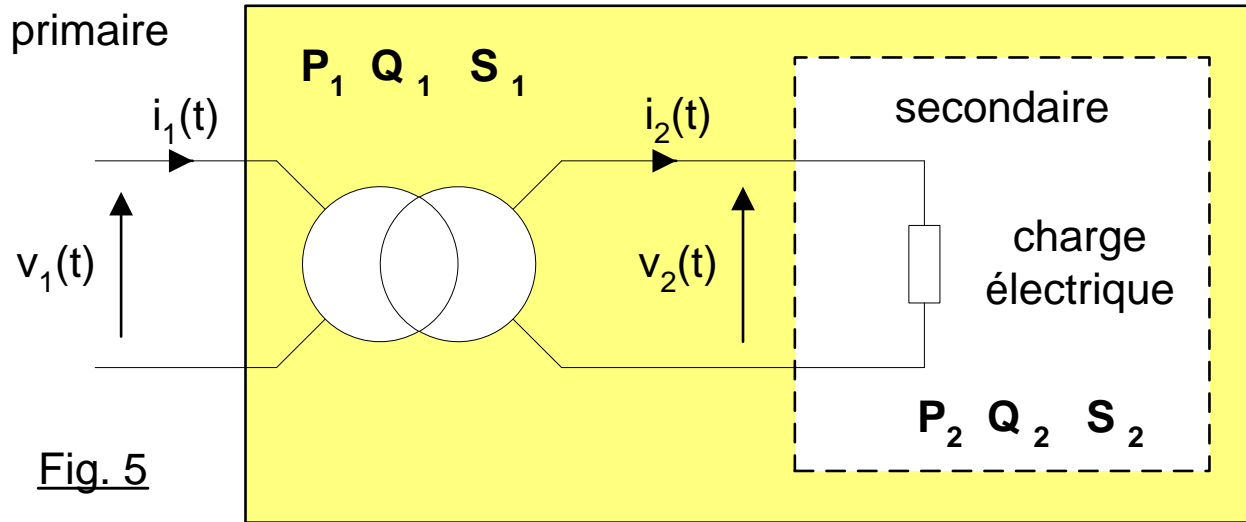
$E_1$  : valeur efficace de la fem induite au primaire (en volts)

$E_2$  : « « « au secondaire

$S$  : section du circuit magnétique (en  $m^2$ )

$\hat{B}$  : champ magnétique maximal (en tesla)

- Bilan de puissance du transformateur parfait



- pas de pertes :

$$P_2 = P_1 \text{ (rendement de 100 \%)}$$

- 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.

- Plaque signalétique

Exemple :      230 V / 24 V                      150 VA                      50 Hz

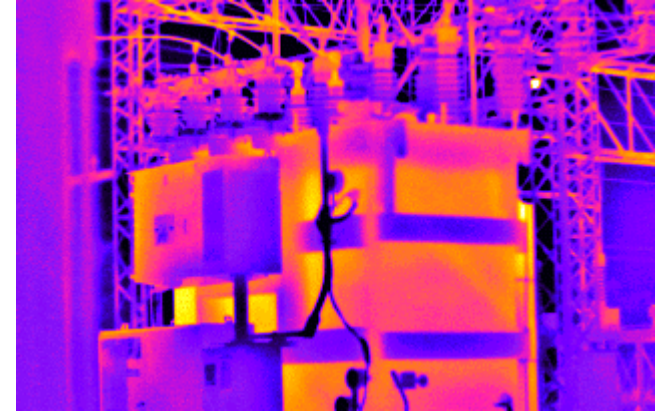
A.N. Calculer le courant efficace primaire nominal ( $I_{1N}$ ).  
Calculer le courant efficace secondaire nominal ( $I_{2N}$ ).

$$I_{1N} = S_N / V_{1N} = 150 / 230 = 0,65 \text{ A}$$

$$I_{2N} = S_N / V_{2N} = 150 / 24 = 6,25 \text{ A}$$



### 3- Transformateur réel



En réalité :

- $P_2 < P_1$  : rendement  $< 1$  car :
  - pertes Joule dans les enroulements
  - pertes fer dans le circuit magnétique
- 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
  - $\Rightarrow$  chute de tension en charge :  $\Delta V_2 = V_{2 \text{ à vide}} - V_2$

- Définition

Rapport de transformation (à vide) :

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

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

Par la suite, on suppose que :

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

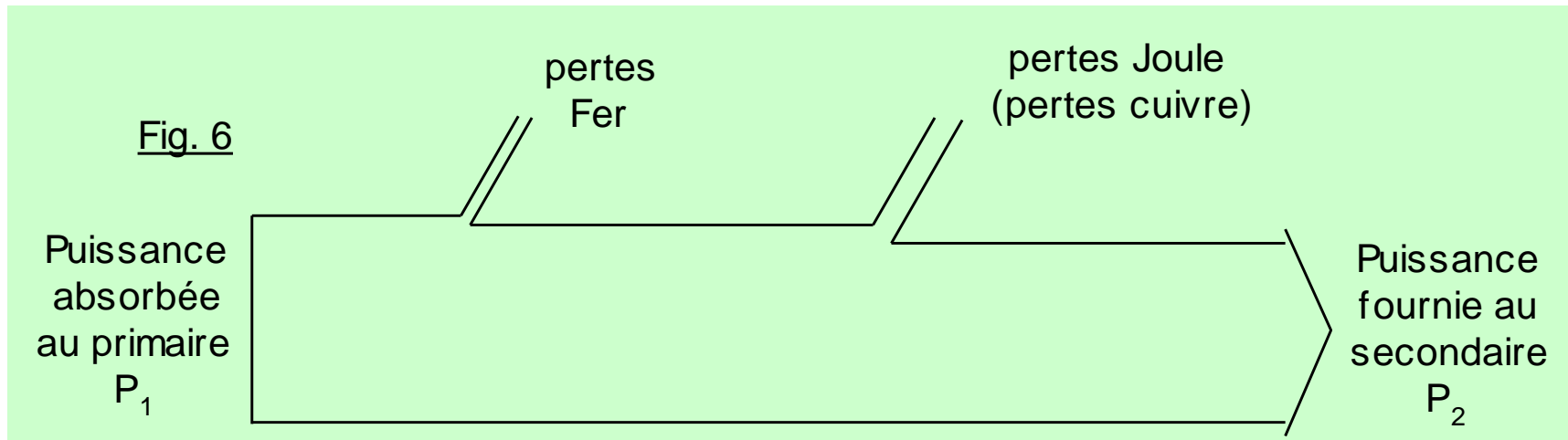
- Deux grands types de transformateurs :

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



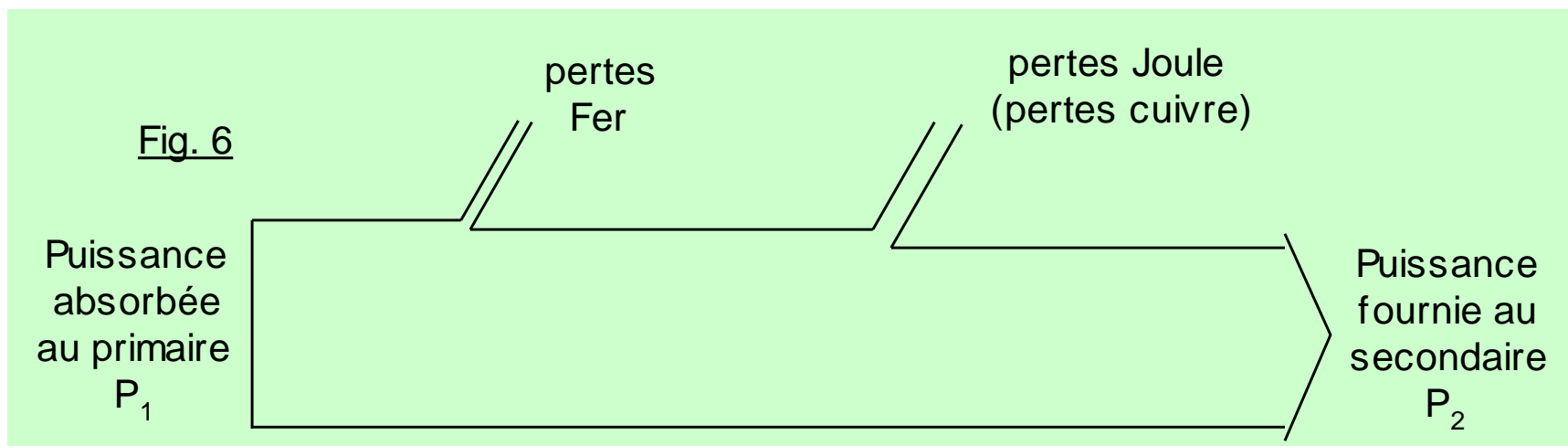
L'enroulement de petite section est relié à la haute tension.

## 4- Bilan de puissances



$P_1$  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 :

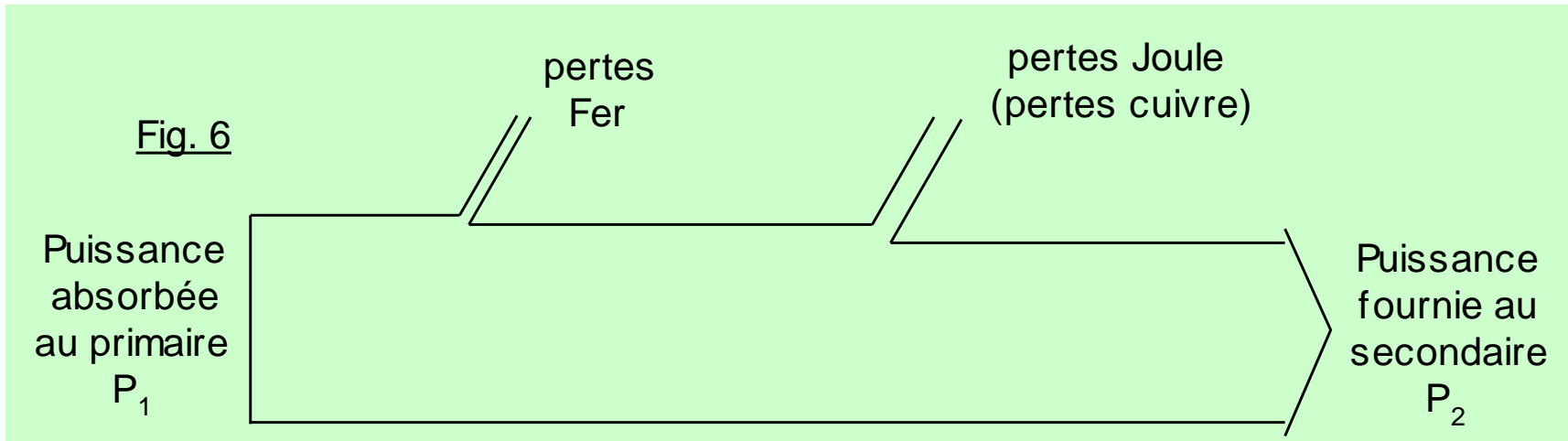
- électrique

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

$R_1$  : résistance de l'enroulement primaire

$R_2$  : “ “ “ secondaire

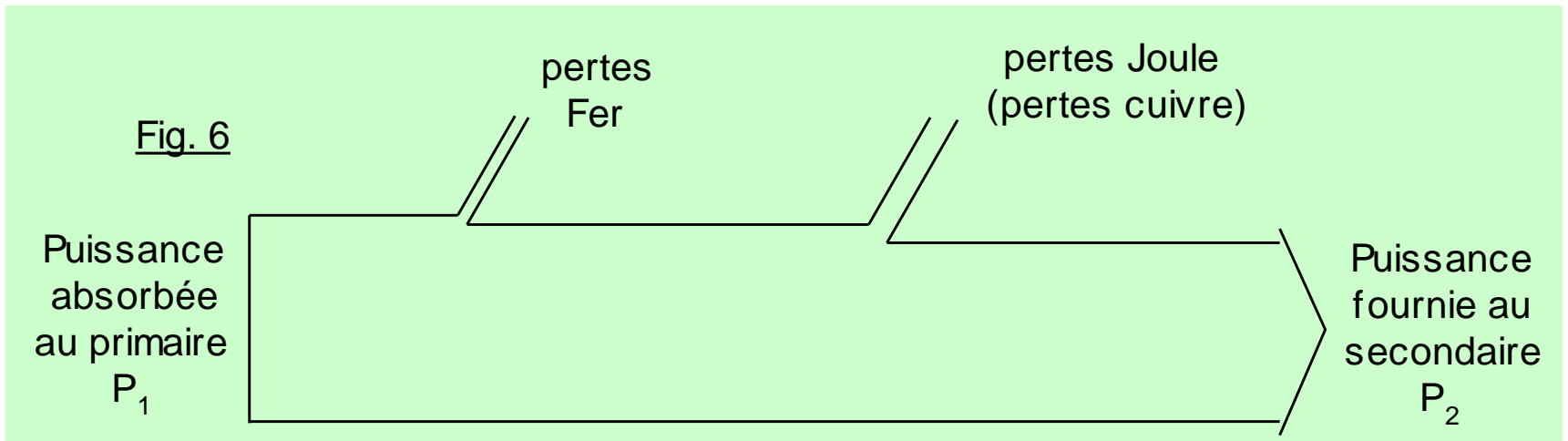
$$P_{\text{Joule}} = R_1 I_1^2 + R_2 I_2^2$$



- magnétique (pertes fer)
  - Pertes par courants de Foucault
  - Pertes par hystérésis

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

$p_{\text{fer}}$  proportionnelles à  $V_1^2$



- Rendement

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + p_{\text{Joule}} + p_{\text{fer}}}$$

## 5- Essais d'un transformateur

### 5-1- Essai avec secondaire à vide

L'essai à vide permet de mesurer :

- Le rapport de transformation  $m$
- Les pertes fer

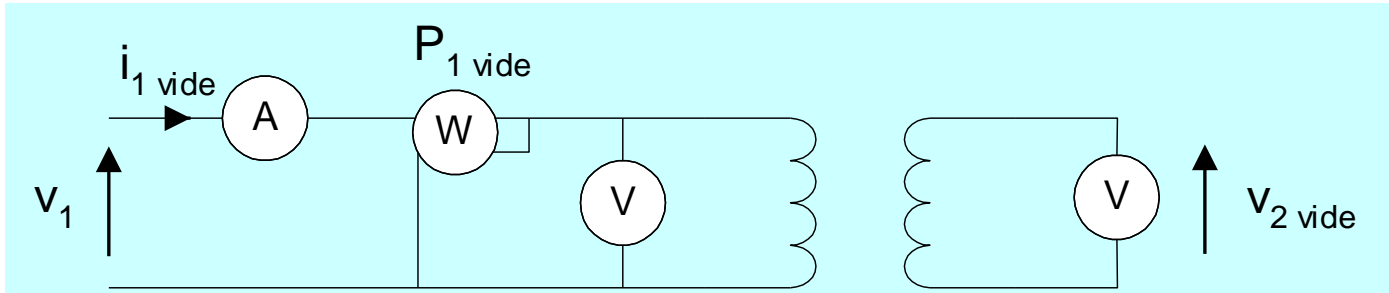


Fig. 7

$$P_1 = p_{\text{Fer}} + p_{\text{Joule}} + P_2$$

$$\text{A vide : } P_2 = 0 \text{ W}$$

$$p_{\text{Joule}} = R_1 I_{1v}^2 + 0 : \text{négligeable car } I_{1v} \text{ négligeable}$$

$$p_{\text{Fer}} \approx P_{1 \text{ vide}}$$



A.N. On mesure :

$$V_1 = V_{1N} = 230 \text{ V}$$

$$V_{2V} = 25,3 \text{ V}$$

$$P_{1V} = 5,0 \text{ W}$$

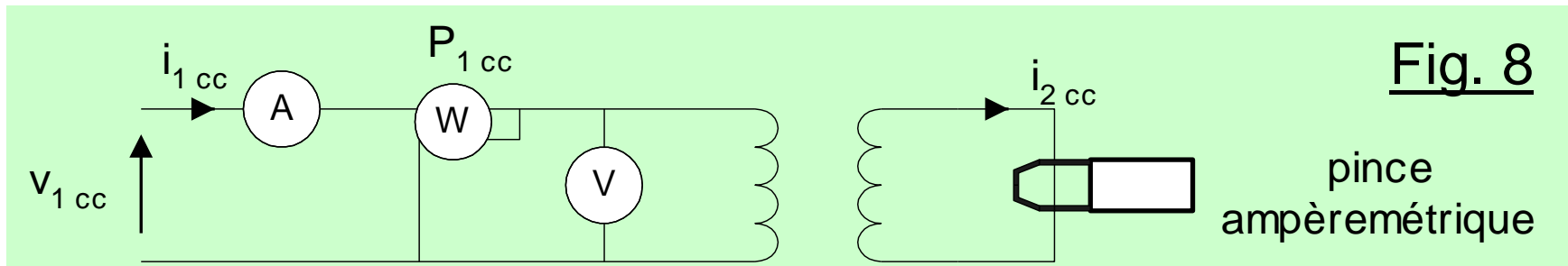
En déduire le rapport de transformation et les pertes fer nominales.

$$m = 25,3 / 230 = 0,11$$

$$p_{\text{Fer N}} = 5 \text{ W}$$

## 5-2- Essai avec secondaire en court-circuit

L'essai en court-circuit permet de mesurer les pertes Joule.



$$P_1 = p_{\text{Fer}} + p_{\text{Joule}} + P_2$$

En court-circuit :  $P_2 = 0 \text{ W}$  (car  $V_2 = 0 \text{ V}$ )

L'essai se fait **sous tension primaire réduite** ( $V_{1\text{cc}} \ll V_{1\text{N}}$ ).

Les pertes fer sont proportionnelles à  $V_1^2$  donc elles sont négligeables.

$$p_{\text{Joule}} \approx P_{1\text{CC}}$$

A.N. On mesure :

$$V_{1CC} = 12,7 \text{ V } (\ll 230 \text{ V})$$

$$I_{2CC} = I_{2N} = 6,25 \text{ A}$$

$$P_{1CC} = 7,8 \text{ W}$$

En déduire les pertes Joules nominales.

$$P_{\text{Joule N}} = 7,8 \text{ W}$$

A.N. On donne  $S_N = 150 \text{ VA}$

La charge est purement résistive.

1) Que vaut la puissance nominale  $P_{2N}$  ?

2) A partir des essais précédents, calculer le rendement nominal.

$$P_{2N} = S_{2N} \cos \varphi_2 = 150 \times 1 = 150 \text{ W}$$

$$\eta_N = \frac{P_{2N}}{P_{2N} + p_{\text{Joule}N} + p_{\text{fer}N}} = \frac{150}{150 + 7,8 + 5} = 92\%$$

## 6- Modèle de Thévenin ramené au secondaire

Vu du secondaire, le modèle électrique d'un transformateur est :

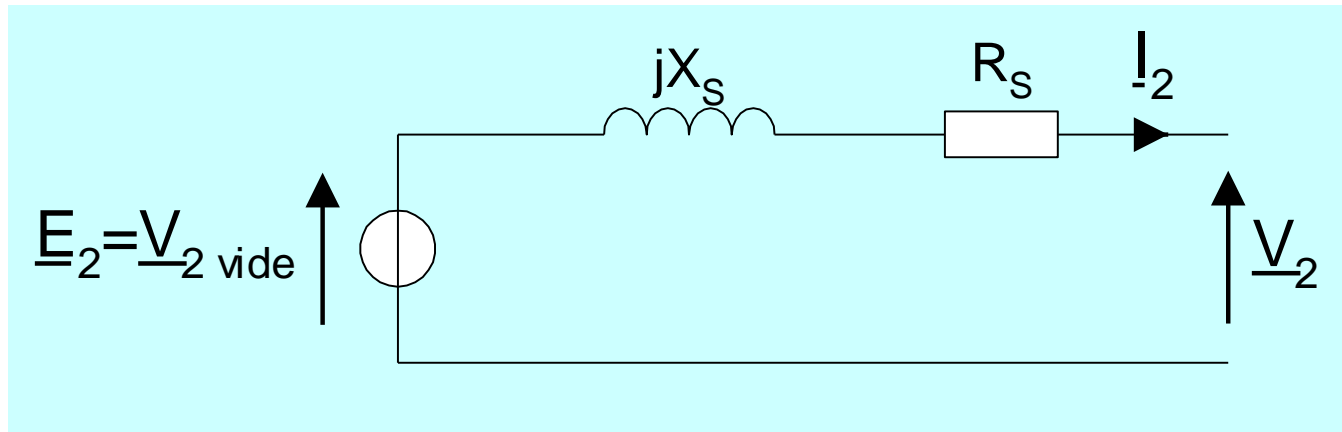


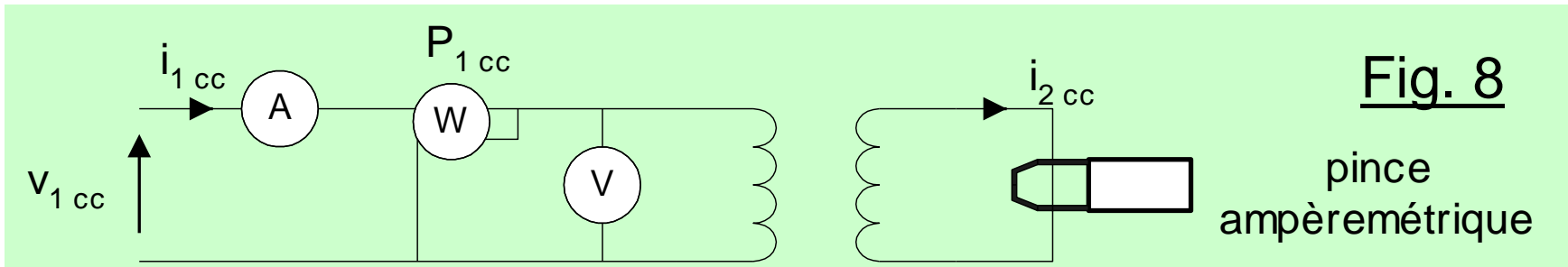
Fig. 9

$R_s$  : résistance des enroulements, ramenée au secondaire

$X_s$  : réactance des fuites magnétiques, ramenée au secondaire

- Détermination expérimentale des éléments du schéma équivalent

Essai en court-circuit :



$$p_{\text{Joule}} \approx P_{1\text{CC}}$$

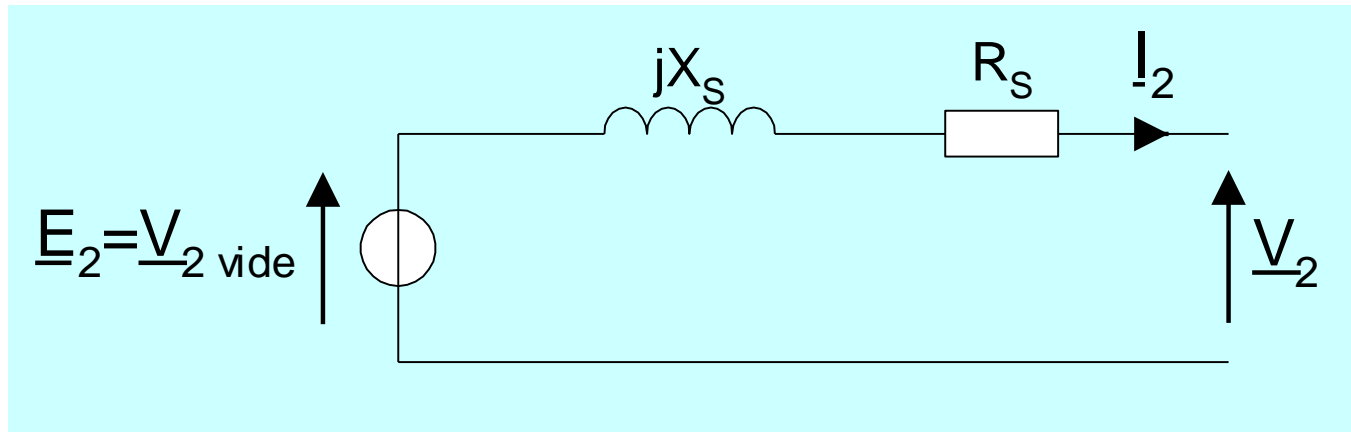
Loi de Joule :

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

A.N.

$$R_s = \frac{7,8}{(6,25)^2} = 0,2 \Omega$$

Fig. 9



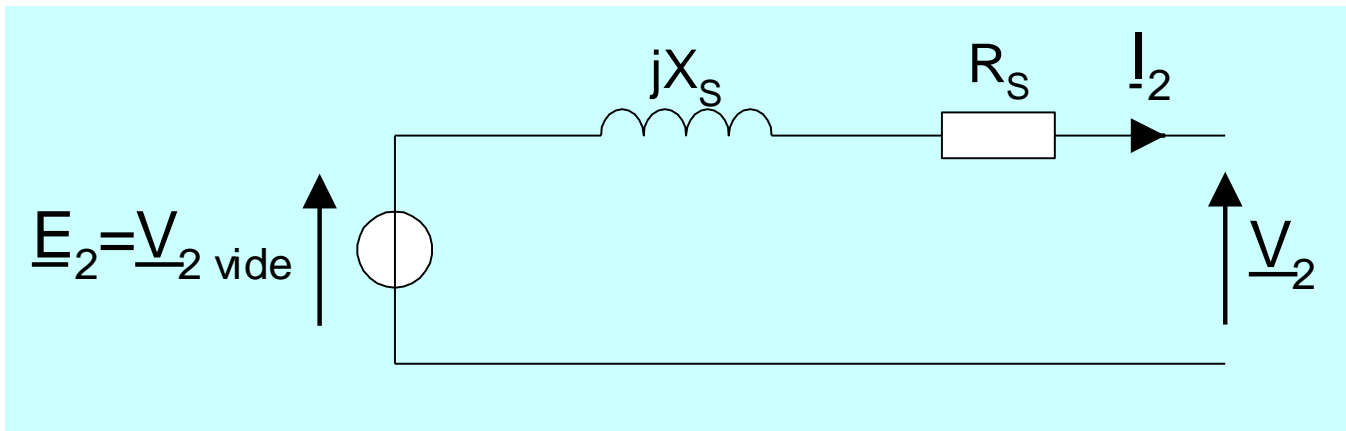
Impédance interne  $Z_s$ :

$$Z_s = \frac{m \cdot V_{1CC}}{I_{2CC}}$$

m est obtenu par l'essai à vide.

A.N. 
$$Z_s = \frac{0,11 \times 12,7}{6,25} = 0,224 \Omega$$

Fig. 9



Réactance  $X_s$  :

$$\underline{Z}_s = R_s + jX_s \quad \Rightarrow \quad Z_s = \sqrt{R_s^2 + X_s^2}$$

$$X_s = \sqrt{Z_s^2 - R_s^2}$$

A.N.  $X_s = \sqrt{(0,224)^2 - (0,2)^2} = 0,1 \Omega$



- Prédétermination du fonctionnement en charge

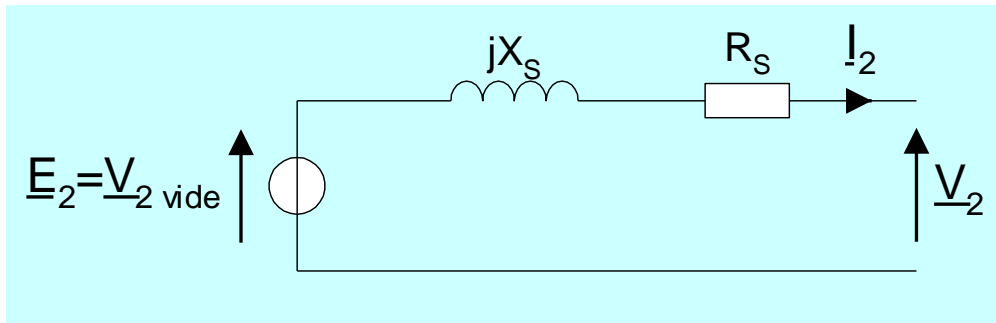


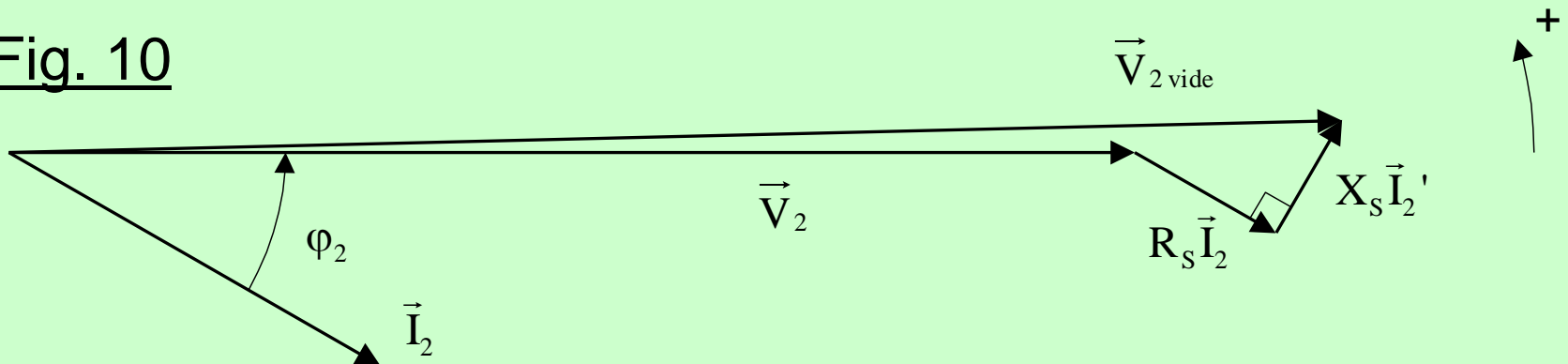
Fig. 9

## Diagramme vectoriel

Loi des branches :  $\underline{V}_2 = \underline{V}_{2\text{vide}} - R_s \underline{I}_2 - jX_s \underline{I}_2$

ou :  $\vec{V}_2 = \vec{V}_{2\text{vide}} - R_s \vec{I}_2 - X_s \vec{I}_2'$

Fig. 10



En pratique :  $R_S I_2$  et  $X_S I_2 \ll V_2$ .

On peut faire l'approximation suivante :

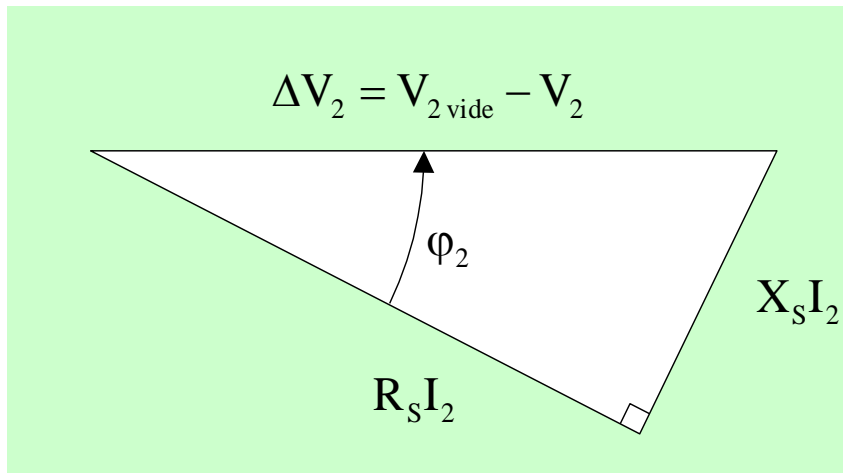


Fig. 11

Formule approchée de la chute de tension au secondaire :

$$\Delta V_2 \approx (R_S \cos \varphi_2 + X_S \sin \varphi_2) \cdot I_2$$

La chute de tension :

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

A.N. Calculer la chute de tension nominale avec une charge résistive.

En déduire la tension secondaire nominale.

$$\Delta V_2 \approx \left( 0,2 \times \underbrace{\cos \varphi_2}_1 + 0,1 \times \underbrace{\sin \varphi_2}_0 \right) \times 6,25 \approx 1,25 \text{ V}$$

$$V_2 = V_{2 \text{ à vide}} - \Delta V_2 = 25,3 - 1,25 \approx 24,0 \text{ V}$$

## 7- Rôle des transformateurs dans le transport et la 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