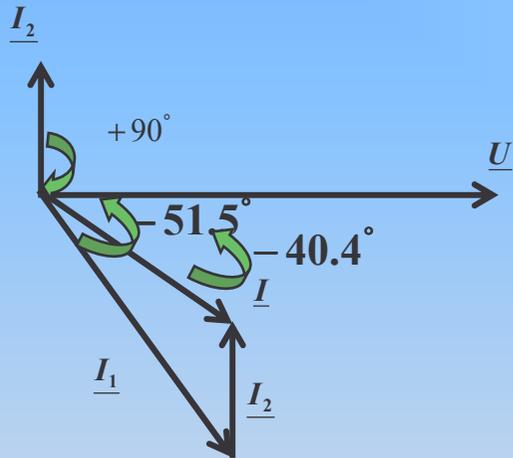




Exercices

Faire un diagramme vectoriel



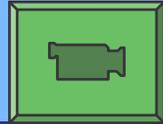
$$\underline{Z}_1 = (50 + j62.8) = 80.3e^{j51.5} \Omega$$

$$\underline{Z}_2 = \frac{1}{j318} = -j\frac{1}{318} = 318e^{-j90} \Omega$$

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{U}}{\underline{Z}_1} = \frac{48e^{j0}}{80.3e^{j51.5}} = 0.598e^{-j51.5} A$$

$$\underline{I}_2 = \frac{\underline{U}}{\underline{Z}_2} = \frac{48e^{j0}}{318e^{-j90}} = 0.151e^{+j90} A$$

$$\underline{I} = 0.489 e^{-j40.4} A$$



Chapitre 2 Courants triphasés équilibrés

1- Système triphasé équilibré

1.1- Définition

1.2- Propriété

2- Couplage des trois phases

2.1- Couplage en étoile

2.2- Couplage en triangle

3- Schéma monophasé équivalent

3.1- Source en étoile

3.2- Source en triangle

3.3- récepteur en triangle

4- Puissances

4.1- Expressions

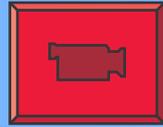
4.2- Propriété

4.3- Mesures

4.4- Calcul d'erreur

5- Étude des circuits électriques triphasés

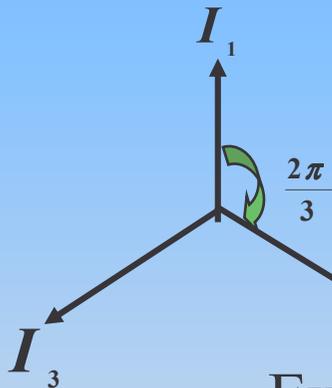
-
-
- $\mapsto \dots 8$



1- Système triphasé équilibré

Courants triphasés équilibrés

1.1 Définition



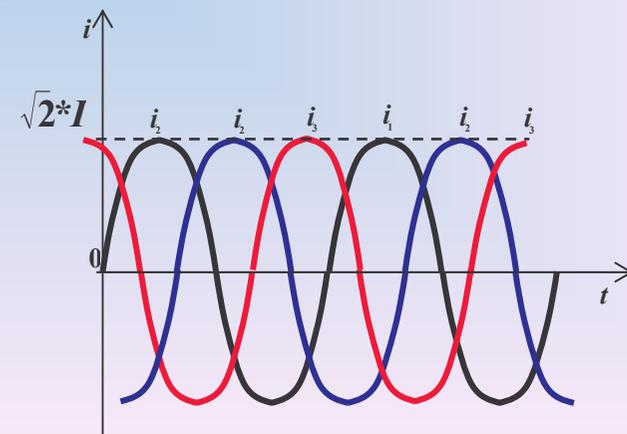
Trois grandeurs sinusoïdales forment un système équilibré si elles ont même valeur efficace et si elles sont régulièrement déphasées entre elles de $\frac{2\pi}{3}$

Expression d'un système triphasé équilibré du courant:

$$i_1 = I \sqrt{2} \cos(\omega t)$$

$$i_2 = I \sqrt{2} \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$i_3 = I \sqrt{2} \cos\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right)$$



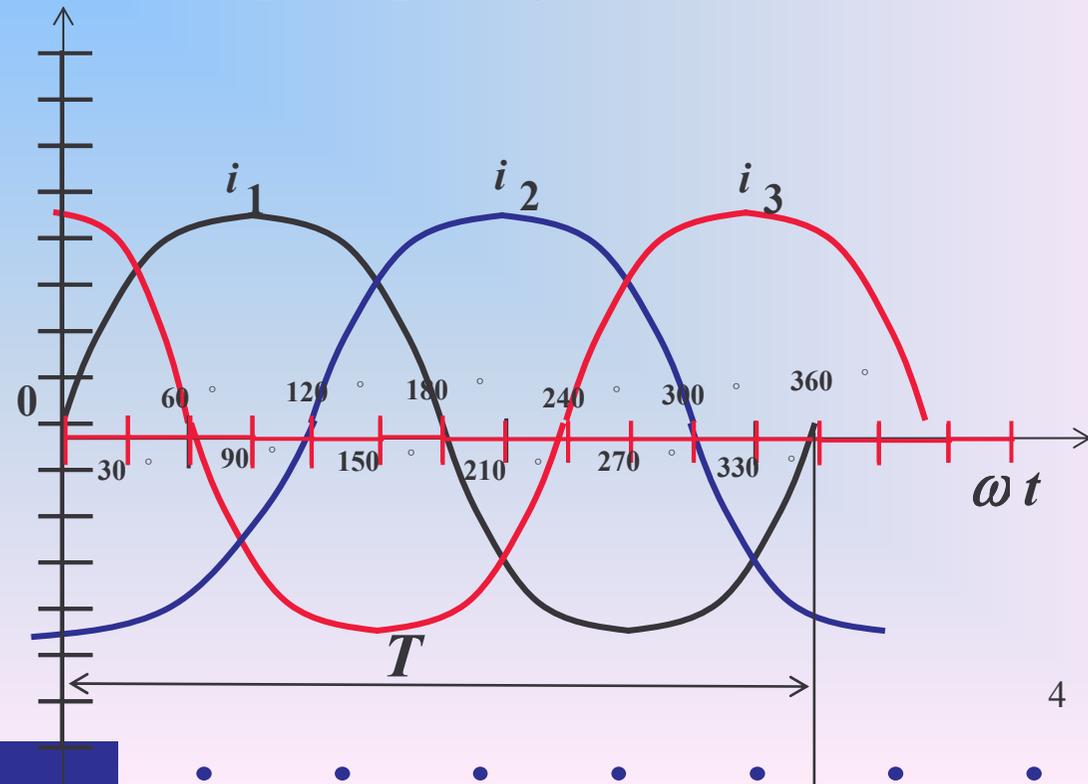
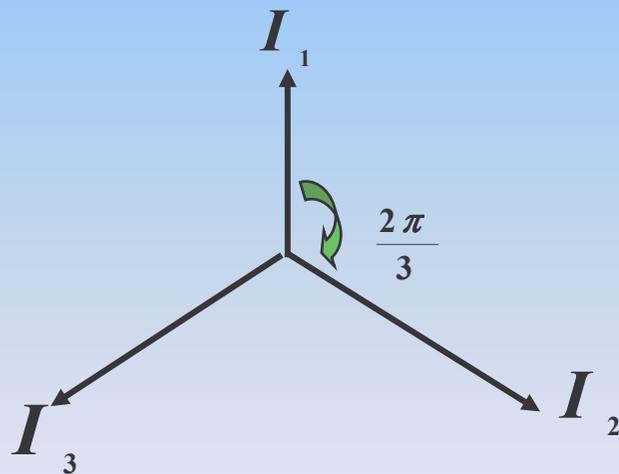


1.2- Propriété

Courants triphasés équilibrés

Le système est équilibré car la construction de Fresnel montre que

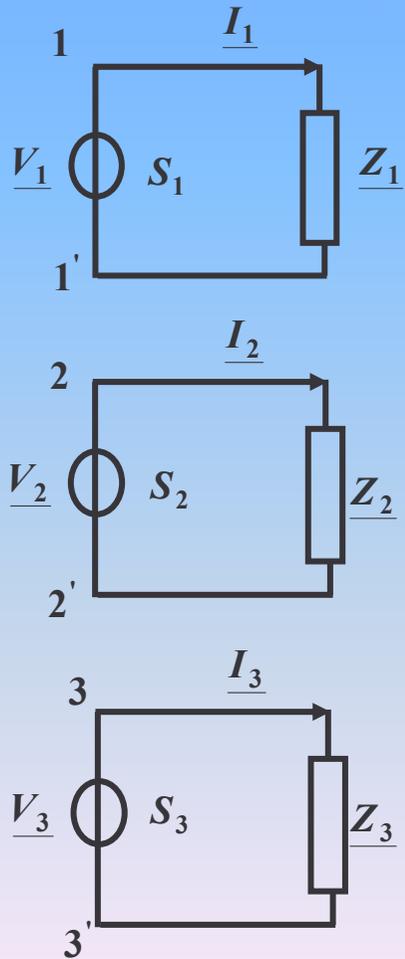
$$\underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_3 = 0 \Leftrightarrow i_1 + i_2 + i_3 = 0$$





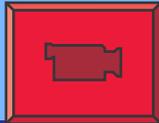
2- Couplage des trois phases

Courants triphasés équilibrés



On considère trois sources de tension (S_1, S_2, S_3) formant un système équilibré débitant sur trois récepteurs identiques (Z_1, Z_2, Z_3)

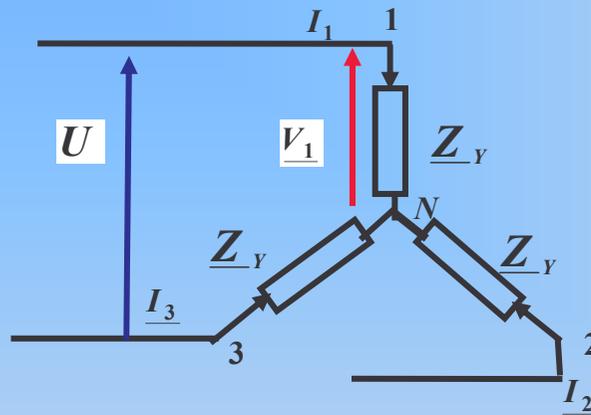
En joignant les extrémités des sources, il apparaît deux montages assurant un système triphasé équilibré.



2.1 Couplage en étoile

Courants triphasés équilibrés

Symbole :



Les bornes 1', 2' et 3' sont regroupées pour former un point neutre

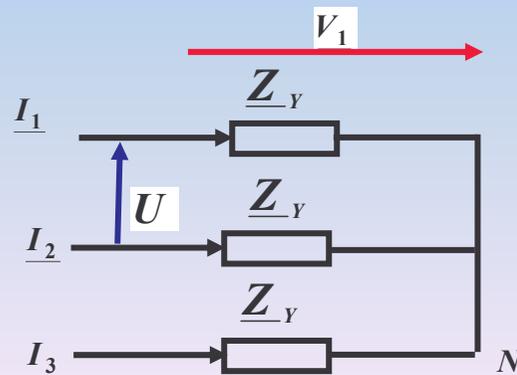
Relations entre les tensions

$$V_1 = V_2 = V_3 = V \quad \text{Tension simple}$$

$$U = \sqrt{3} * V \quad \text{Tension composée}$$

$$V_1 + V_2 + V_3 = 0$$

Même branchement représenté de deux façons différentes



Relations entre les courants

$$I_1 = I_2 = I_3 = I$$

$$I_1 + I_2 + I_3 = I_N = 0$$

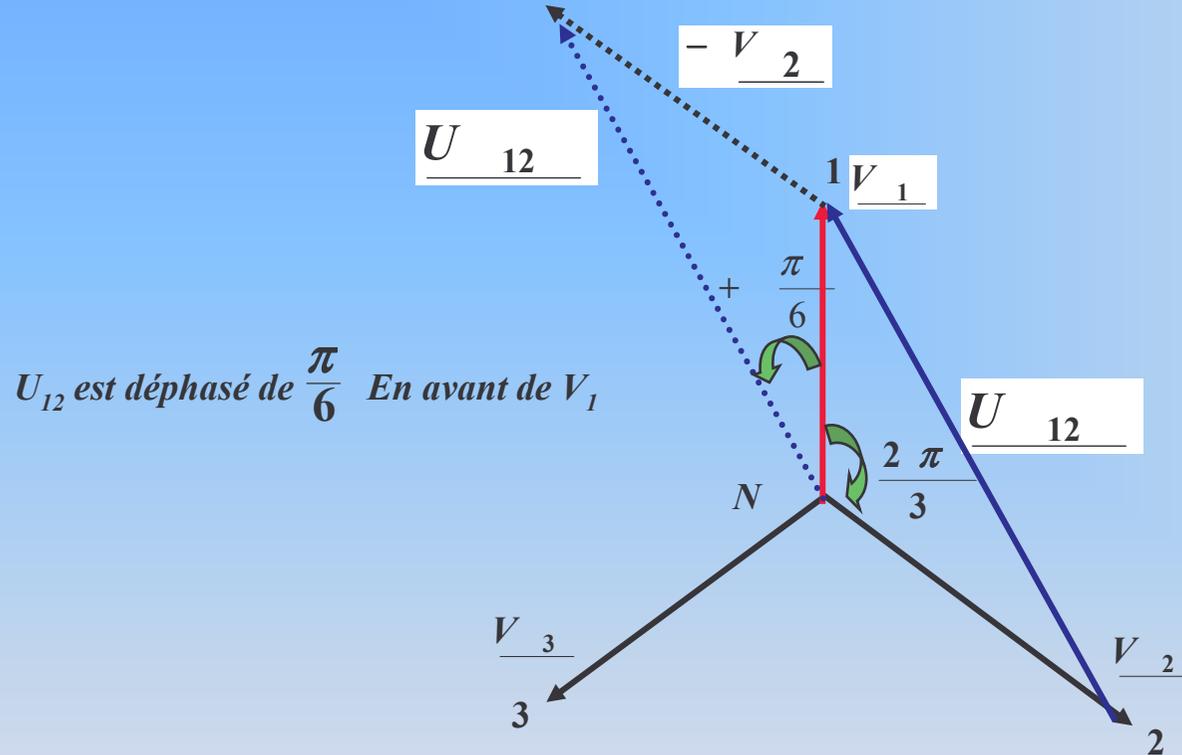
(I) courant en ligne

(j) courant traversant le récepteur Z



2.1 Couplage en étoile

Courants triphasés équilibrés



$$\underline{U}_{12} = \sqrt{3} * \underline{V}_1 * e^{j\frac{\pi}{6}}$$

\underline{U}_{12} est déphasé de $\frac{\pi}{6}$ En avant de V_1

$$\underline{U}_{12} = \underline{V}_1 - \underline{V}_2$$

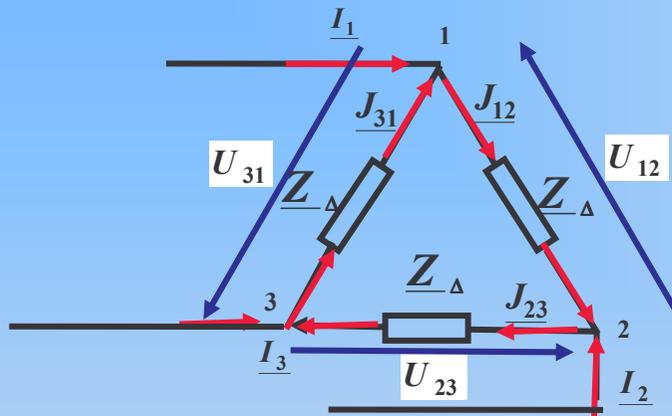
$$\underline{U}_{23} = \underline{V}_2 - \underline{V}_3$$

$$\underline{U}_{31} = \underline{V}_3 - \underline{V}_1$$



2.2 Couplage en triangle Courants triphasés équilibrés

Symbole :



Les impédances sont reliées entre elles , pour former un triangle

Relations entre les tensions

$$U_{31} = U_{23} = U_{12} = U \quad \text{Tension composée}$$

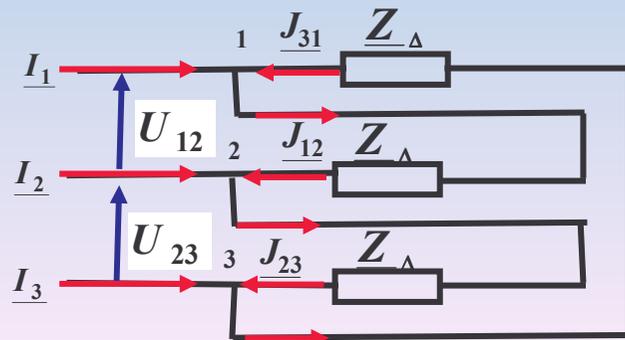
Relations entre les courants côté récepteur

$$I_1 = j_{12} - j_{31}$$

$$I_2 = j_{23} - j_{12}$$

$$I_3 = j_{31} - j_{23}$$

Même branchement représenté de deux façons différentes

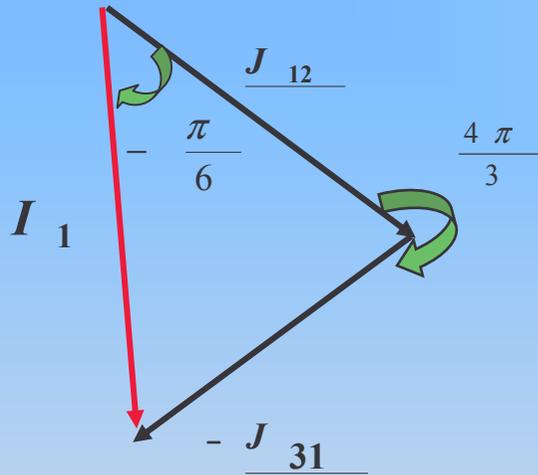


$$J = \frac{I}{\sqrt{3}} \quad \text{Courant polygonal}$$



2.2 Couplage en triangle Courants triphasés équilibrés

$$\underline{I}_1 = (\underline{J}_{12} - \underline{J}_{31})$$



$$\underline{I}_1 = \sqrt{3} * \underline{j}_{12} * e^{-j\frac{\pi}{6}}$$

$$J = \frac{I}{\sqrt{3}}$$

I_1 est déphasé de $\frac{\pi}{6}$ En arrière de J_{12}



Résumé

Courants triphasés équilibrés

	Couplage étoile	Couplage triangle
Relation entre U et V	$V = \frac{U}{\sqrt{3}}$	U
Relation entre I et J	$I = J$	$J = \frac{I}{\sqrt{3}}$
Déphasage	$\varphi(I, V)$	$\varphi(J, U)$
Résistance équivalente	$R_{AB} = 2 \times r$	$R_{AB} = \frac{2 \times r}{3}$



Aspects pratiques

Courants triphasés équilibrés

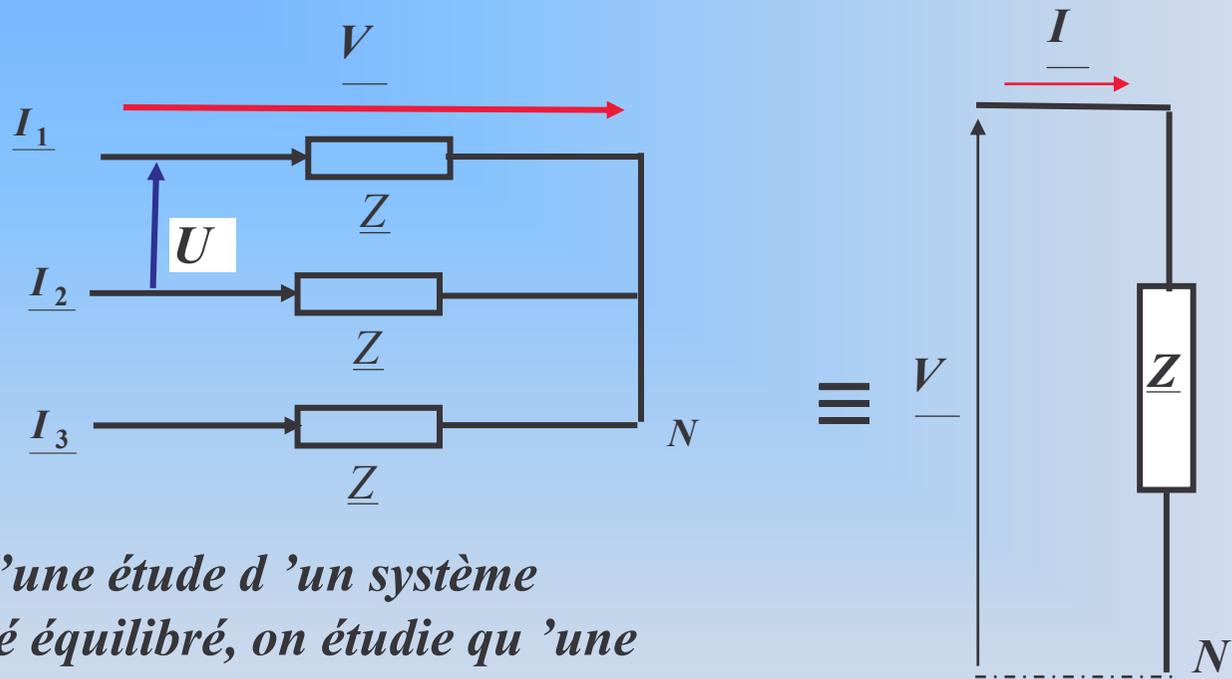
Avantages d'un système triphasé par rapport à un système monophasé

- ↓ Les machines triphasées ont des puissances de plus de 50% supérieures aux machines monophasées de même masse et donc leurs prix sont moins élevés.
- ↓ Lors du transport de l'énergie électrique, les pertes sont moindres en triphasé.



3- Schéma monophasé équivalent

Courants triphasés équilibrés



Lors d'une étude d'un système triphasé équilibré, on étudie qu'une seule phase sachant que ce qui se passe dans les autres phases est identique en valeur efficace et décalé

de $\frac{2\pi}{3}$ ou $\frac{4\pi}{3}$

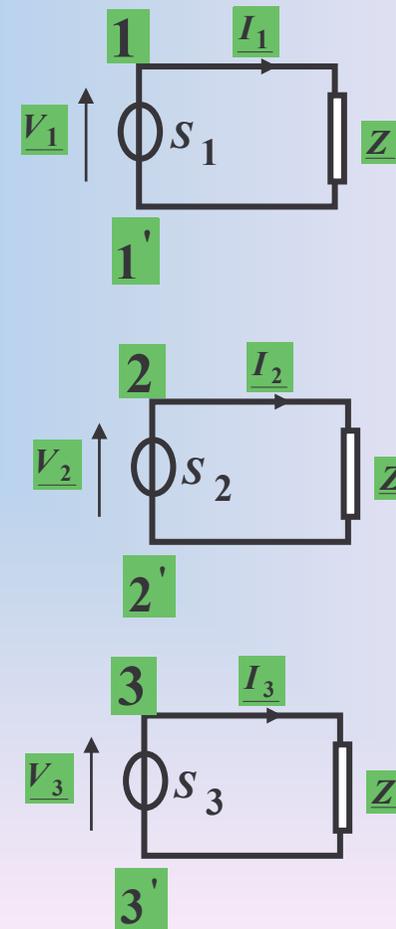
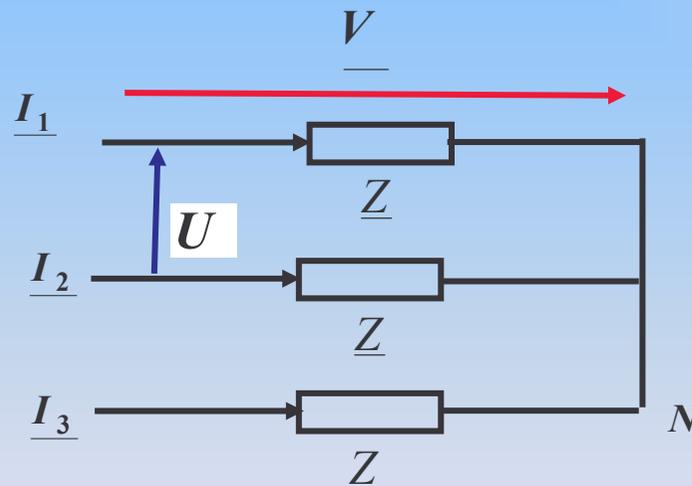


3.1-Récepteur en étoile

Courants triphasés équilibrés

Démarche inverse à celle vue en 2.1

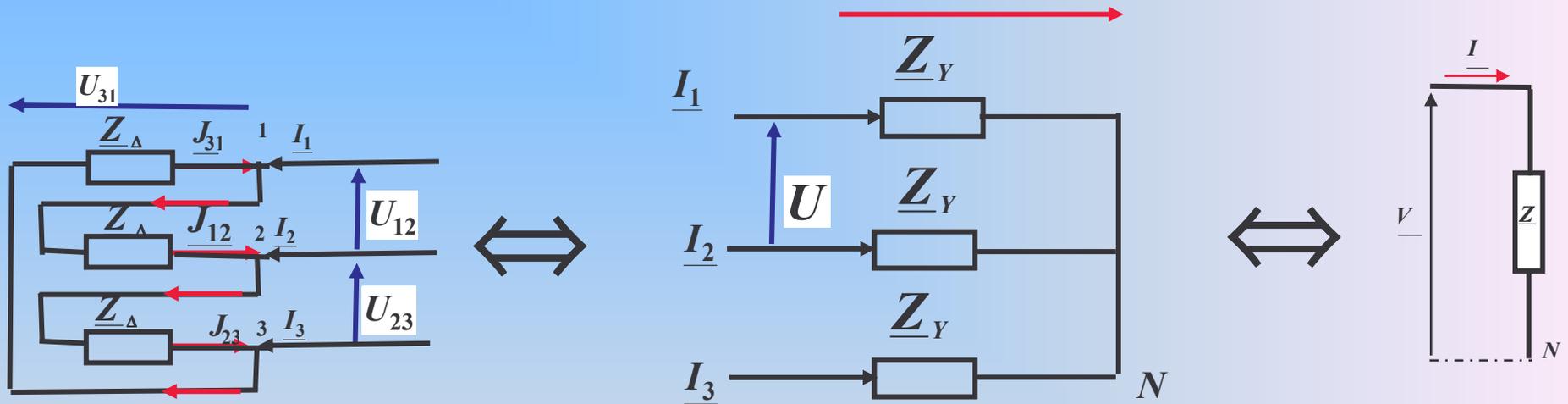
$$P_{mono} = \frac{P_{tri}}{3}$$





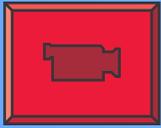
3.2- Récepteur en triangle Courants triphasés équilibrés

Démarche inverse à celle vue en 2.2



$$\underline{Z}_Y = \frac{\underline{Z}_\Delta}{3}$$

$$V = \frac{U}{\sqrt{3}}$$



Exercice 10 3.3- Récepteur en triangle

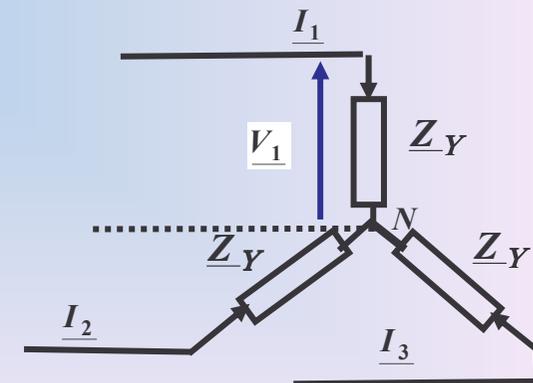
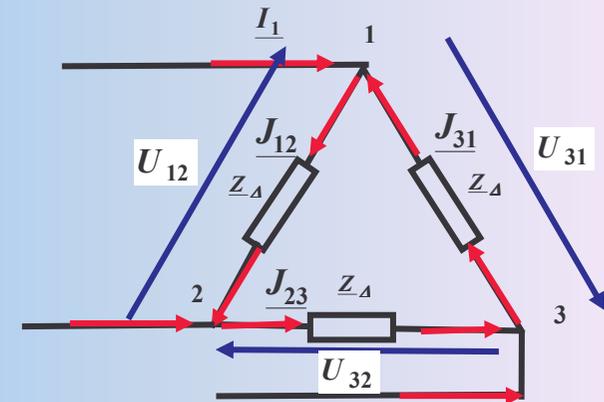
Courants triphasés équilibrés

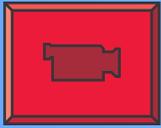
$$Z_Y = \frac{V_1}{I_1} = \frac{V_1}{J_{12} - J_{31}}$$

$$J_{31} + I_1 - J_{12} = 0$$

$$J_{12} = \frac{U_{12}}{Z_{\Delta}} = \frac{V_1 - V_2}{Z_{\Delta}}; J_{31} = \frac{U_{31}}{Z_{\Delta}} = \frac{V_3 - V_1}{Z_{\Delta}}$$

$$I_1 = \frac{V_1 - V_2}{Z_{\Delta}} - \frac{V_3 - V_1}{Z_{\Delta}} = \frac{2V_1 - V_2 - V_3}{Z_{\Delta}}$$





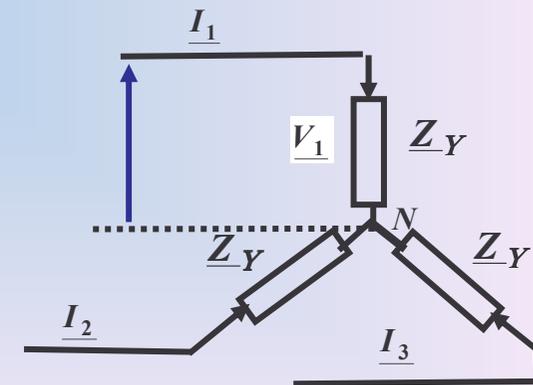
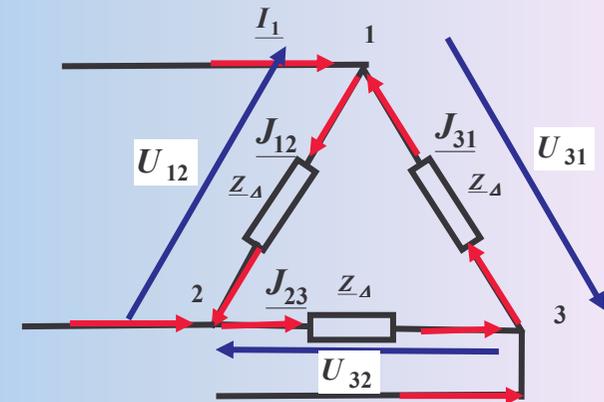
Exercice 10 3.3- Récepteur en triangle

Courants triphasés équilibrés

$$V_1 + V_2 + V_3 = 0; V_1 = -(V_2 + V_3)$$

$$I_1 = \frac{2V_1 - V_2 - V_3}{Z_{\Delta}} = \frac{3V_1}{Z_{\Delta}}$$

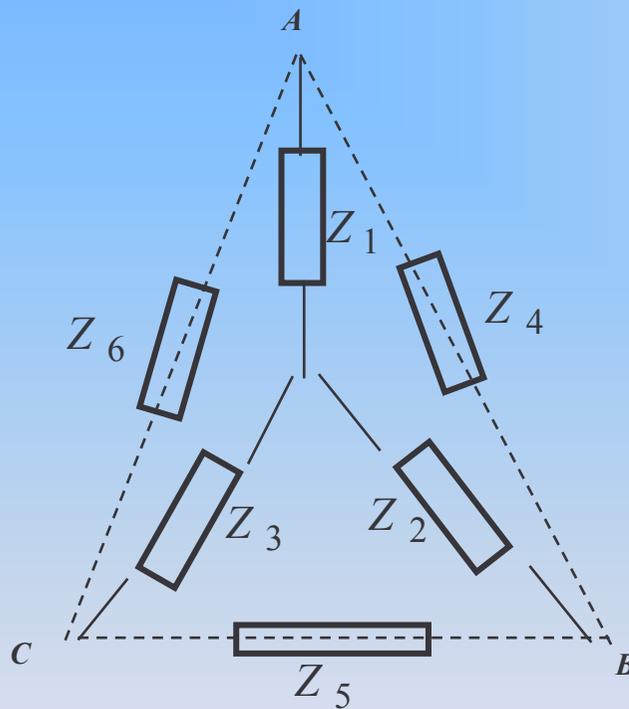
$$Z_Y = \frac{V_1}{I_1} = \frac{Z_{\Delta}}{3}$$





Equivalence étoile- triangle et triangle- étoile **Courants triphasés équilibrés**

Equivalence étoile - Triangle



$$Z_4 = \frac{Z_1 \times Z_2 + Z_2 \times Z_3 + Z_3 \times Z_1}{Z_3}$$

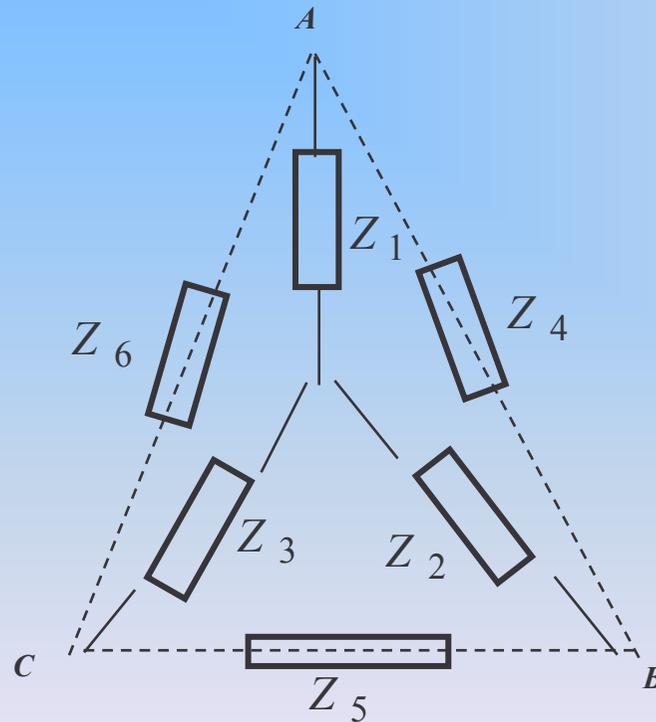
$$Z_5 = \frac{Z_1 \times Z_2 + Z_2 \times Z_3 + Z_3 \times Z_1}{Z_1}$$

$$Z_6 = \frac{Z_1 \times Z_2 + Z_2 \times Z_3 + Z_3 \times Z_1}{Z_2}$$



Equivalence étoile- triangle et triangle- étoile **Courants triphasés équilibrés**

Equivalence Triangle - Etoile



$$Z_1 = \frac{Z_6 \times Z_4}{Z_4 + Z_5 + Z_6}$$

$$Z_2 = \frac{Z_4 \times Z_5}{Z_4 + Z_5 + Z_6}$$

$$Z_3 = \frac{Z_6 \times Z_5}{Z_4 + Z_5 + Z_6}$$

4- Puissances

Courants triphasés équilibrés

4.1-Expressions

Couplage étoile $V = \frac{U}{\sqrt{3}}$

$$P_1 = VI \cos \varphi$$

$$P = 3P_1 = 3VI \cos \varphi = \sqrt{3}UI \cos \varphi$$

$$Q = \sqrt{3}UI \sin \varphi$$

$$S = \sqrt{3}UI$$

$$\cos \varphi = \frac{P}{S}$$

Couplage triangle $J = \frac{I}{\sqrt{3}}$

$$P_1 = UJ \cos \varphi$$

$$P = 3P_1 = 3UJ \cos \varphi = \sqrt{3}UI \cos \varphi$$

$$Q = \sqrt{3}UI \sin \varphi$$

$$S = \sqrt{3}UI$$

$$\cos \varphi = \frac{P}{S}$$



4.2- Propriété

Courants triphasés équilibrés

$$p = v_1 i_1 + v_2 i_2 + v_3 i_3$$

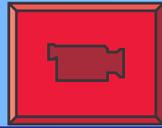
$$p(t) = 2VI \left[\cos(\omega t) \cos(\omega t - \varphi) + \right. \\ \left. \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3} - \varphi\right) + \right. \\ \left. \cos\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \cos\left(\omega t - \frac{4\pi}{3} - \varphi\right) \right]$$

$$p = 3VI \cos \varphi +$$

$$VI \left[\cos(2\omega t - \varphi) + \cos\left(2\omega t - \frac{4\pi}{3} - \varphi\right) + \cos\left(2\omega t - \frac{8\pi}{3} - \varphi\right) \right]$$

En triphasé équilibré, la puissance fluctuante est nulle et la puissance instantanée est égale à la puissance active.

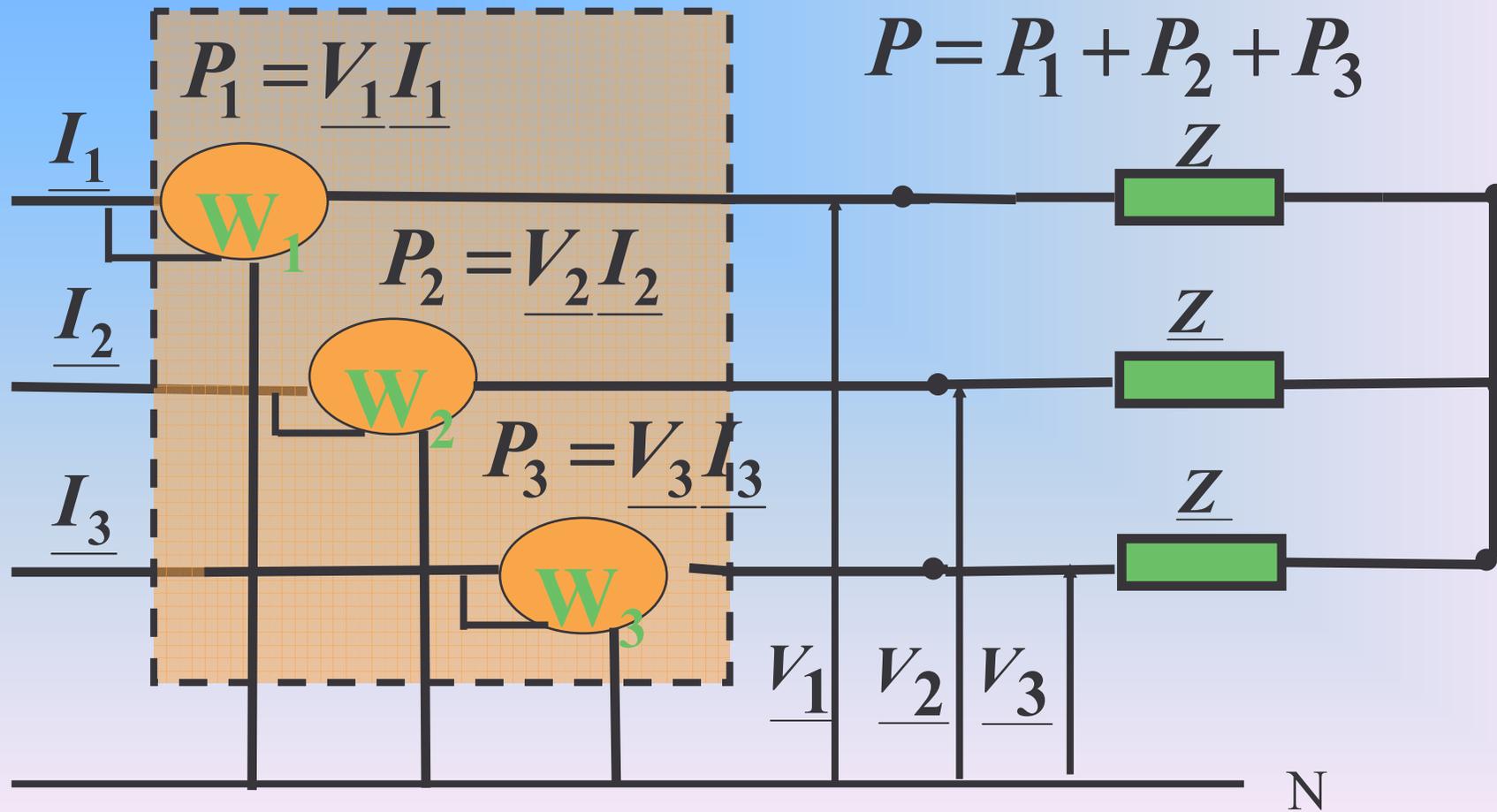
$$p = P = 3VI \cos \varphi$$



4.3-Mesures

Courants triphasés équilibrés

Méthode des 3 wattmètres

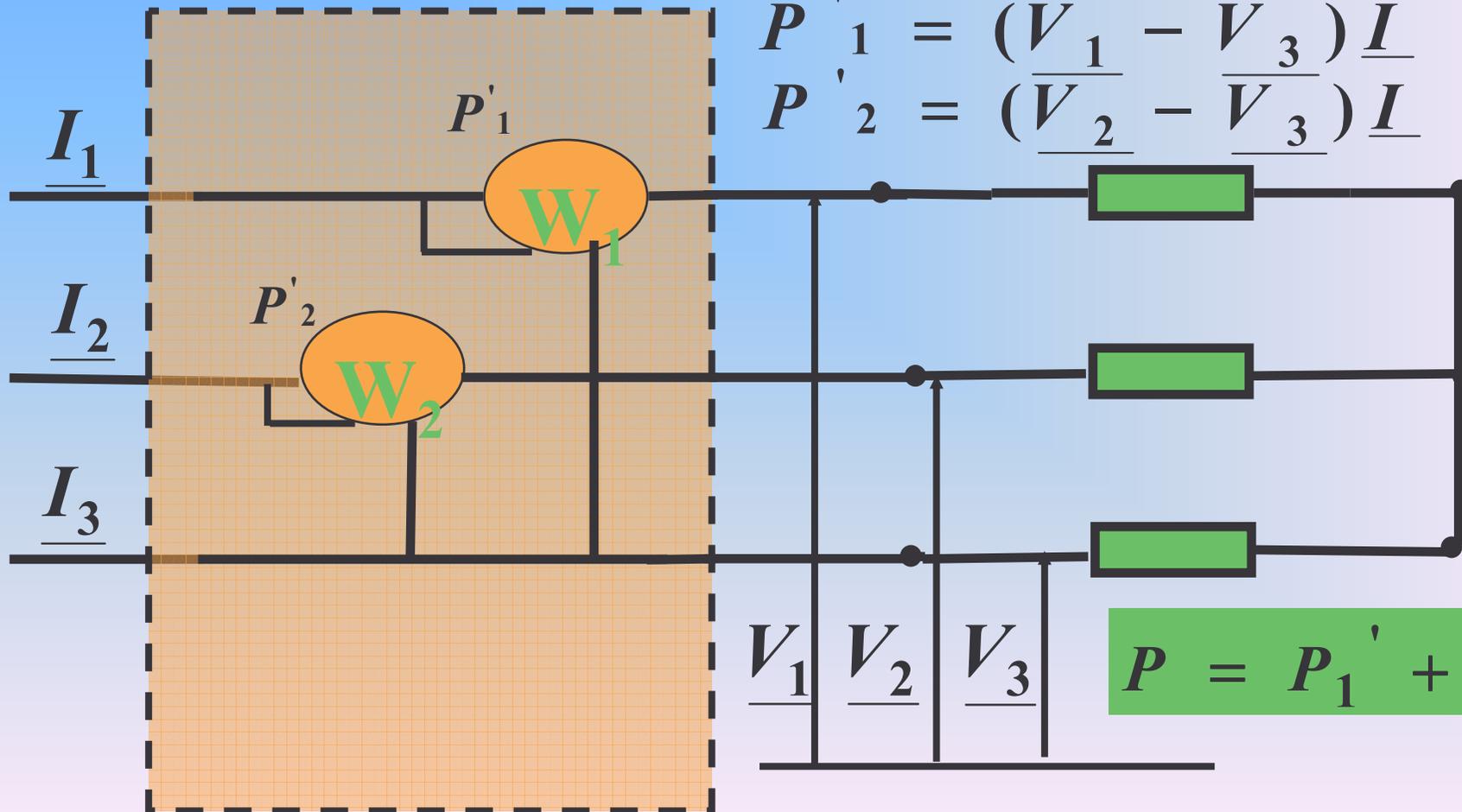


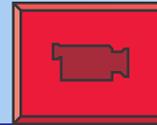


4.3-Mesures

Courants triphasés équilibrés

Méthode des 2 wattmètres



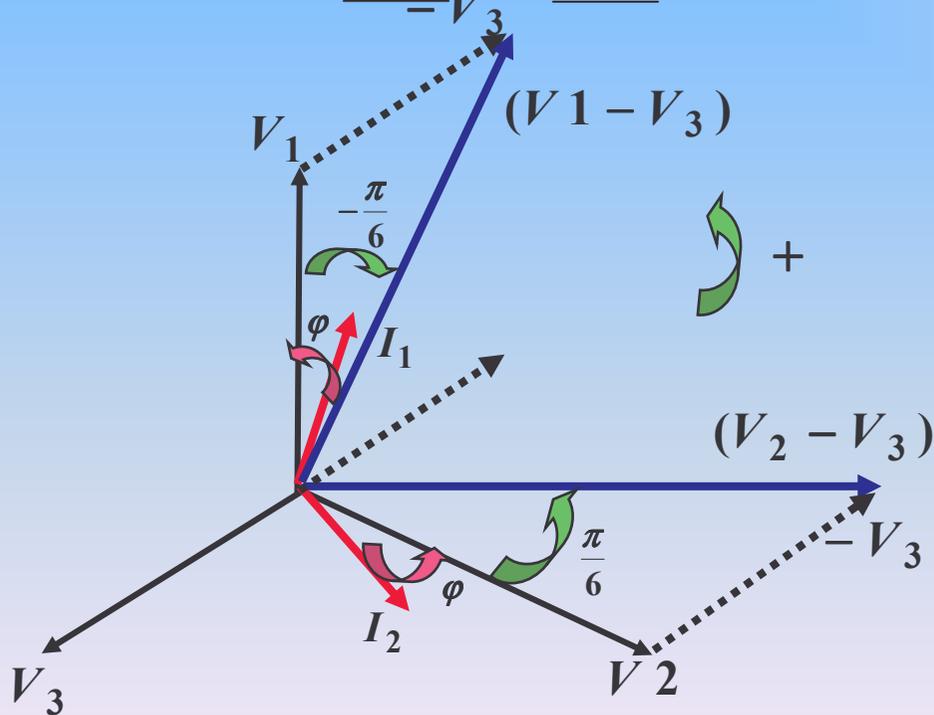


4.3-Mesures

Courants triphasés équilibrés

$$P'_1 = (\underline{V}_1 - \underline{V}_3) \underline{I}$$

$$P'_2 = (\underline{V}_2 - \underline{V}_3) \underline{I}$$



$$P'_1 = \sqrt{3}VI \cos(\varphi - \frac{\pi}{6})$$

$$P'_2 = \sqrt{3}VI \cos(\varphi + \frac{\pi}{6})$$

$$P'_1 + P'_2 = \sqrt{3}VI ((\cos(\varphi - \frac{\pi}{6}) + \cos(\varphi + \frac{\pi}{6})))$$

$$P'_1 + P'_2 = \sqrt{3}VI * 2 \cos \varphi \cos \frac{\pi}{6} = 3VI \cos \varphi$$

$$P'_1 - P'_2 = \sqrt{3}VI \sin \varphi = \frac{Q}{\sqrt{3}}$$

$$Q = \sqrt{3}(P'_1 - P'_2)$$



4.4- Calcul d'erreur

Courants triphasés équilibrés

En régime monophasé:

$$P = VI \cos \varphi$$

$$\ln P = \ln V + \ln I + \ln \cos \varphi$$

$$\frac{\partial \ln P}{\partial P} dP = \frac{\partial \ln V}{\partial V} dV + \frac{\partial \ln I}{\partial I} dI + \frac{\partial \ln \cos \varphi}{\partial \cos \varphi} d \cos \varphi$$

$$\Delta P = (\Delta V \times I \cos \varphi + V \times \Delta I \times \cos \varphi + VI \times \underbrace{\Delta \cos \varphi}_{\sin \varphi \Delta \varphi})$$

En régime triphasé:

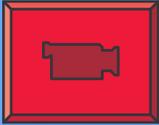
$$\Delta P = \sqrt{3} (\Delta U \times I \cos \varphi + U \times \Delta I \times \cos \varphi + UI \times \underbrace{\Delta \cos \varphi}_{\sin \varphi \Delta \varphi})$$



4.4- Calcul d'erreur

Courants triphasés équilibrés

$$\Delta V = \underbrace{\frac{\textit{classe} \times \textit{calibre}}{100}}_{\textit{classe}} + \underbrace{\frac{\textit{précision lecture} \times \textit{calibre}}{\textit{échelle}}}_{\textit{lecture}}$$



5- Étude des circuits électriques triphasés

Courants triphasés équilibrés

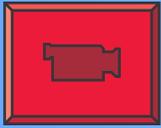
↙ On se ramène toujours au schéma monophasé équivalent

↙ Si le récepteur est en triangle et que son régime aux bornes est connu, il faut le remplacer par un récepteur en étoile qui aurait le même régime aux bornes.

$$\overline{Z}_Y = \frac{\overline{Z}_\Delta}{3}$$

$$V = \frac{U}{\sqrt{3}}$$

$$P_{\text{mono.équi.}} = \frac{P_{\text{triphase}}}{3}$$

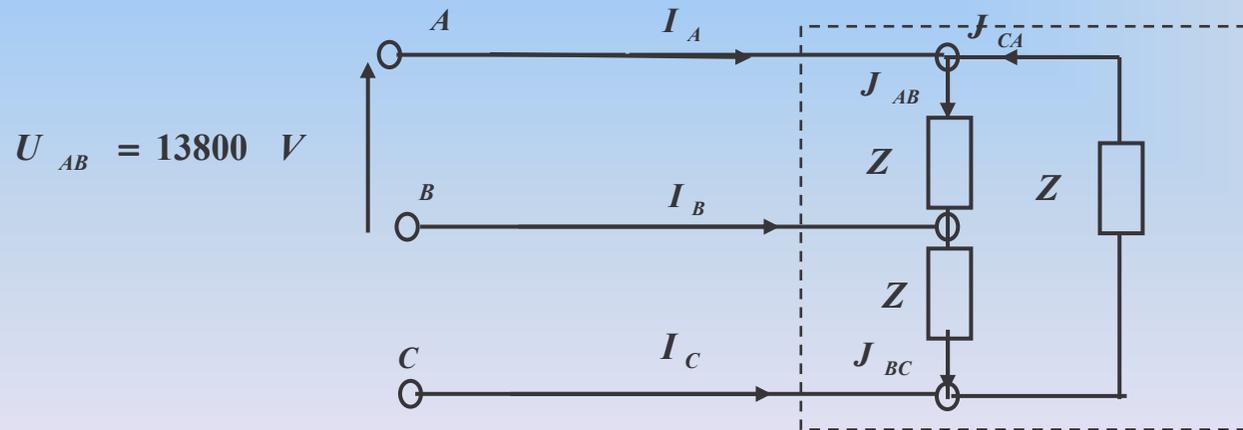


5- Étude des circuits électriques triphasés

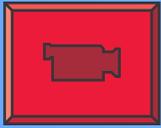
Courants triphasés équilibrés

Exercice 12

- 1.1 Donnez le schéma équivalent monophasé du circuit triphasé ci-dessous
- 1.2 Calculez les grandeurs suivantes
 - La puissance active totale dans la charge **P**
 - La puissance réactive totale **Q**
 - La puissance complexe totale **S**

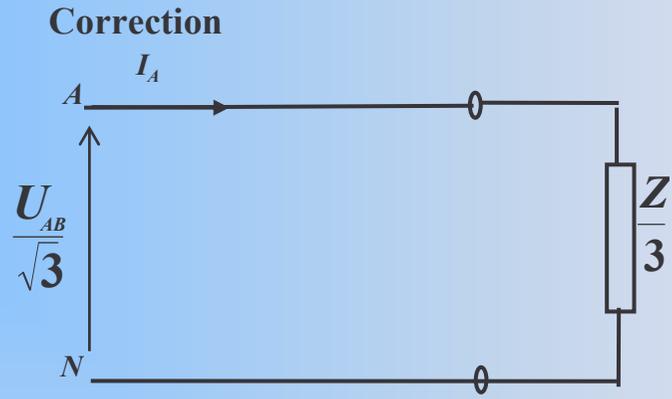


$$Z = (240 + j70)\Omega$$



5- Étude des circuits électriques triphasés Courants triphasés équilibrés

1.1. Le circuit monophasé équivalent



1.2.1. La puissance active totale dans la charge P

$$P = R * \frac{V^2}{Z^2} = 80 * \frac{\left(\frac{13800}{\sqrt{3}}\right)^2}{80^2 + 23.33^2} = 731299.68W$$

$$P_{3\phi} \cong 2194 \text{ kW}$$

1.2.2. La puissance réactive totale dans la charge Q

$$Q = X * \frac{V^2}{Z^2} = 23.33 * \frac{\left(\frac{13800}{\sqrt{3}}\right)^2}{80^2 + 23.33^2} = 213265.27VAR$$

$$Q_{3\phi} \cong 640 \text{ kVAR}$$



5- Étude des circuits électriques triphasés

Courants triphasés équilibrés

1.2.3. La puissance complexe totale fournie par la source

$$S_{3\varphi} = \sqrt{(P^2 + Q^2)} \cong 2285 \text{ kVA}$$



5- Étude des circuits électriques triphasés

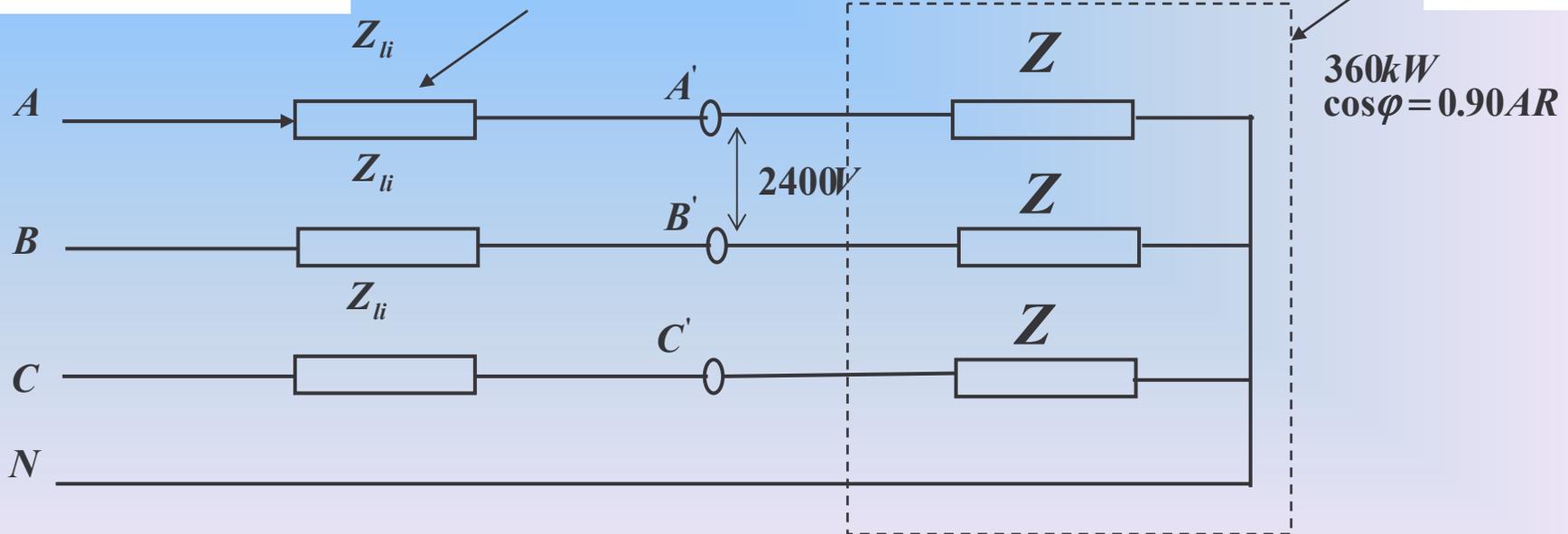
Courants triphasés équilibrés

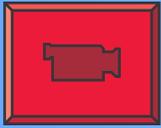
1.1 Donnez le schéma équivalent monophasé du circuit triphasé ci-dessous

$$Z_{li} = (0.35 + j2.1)$$

Impédance de la ligne

charge



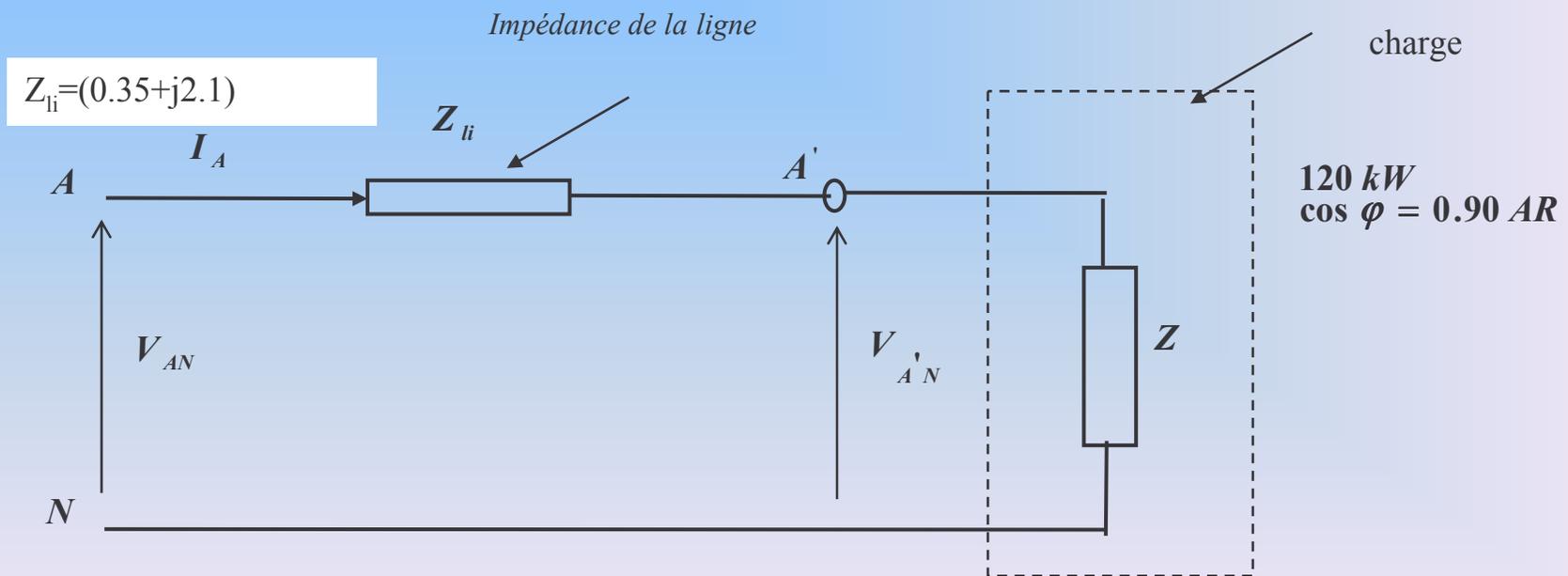


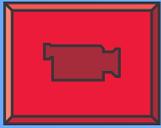
5- Étude des circuits électriques triphasés

Courants triphasés équilibrés

Corrections

1.1. Le circuit monophasé équivalent :





5- Étude des circuits électriques triphasés

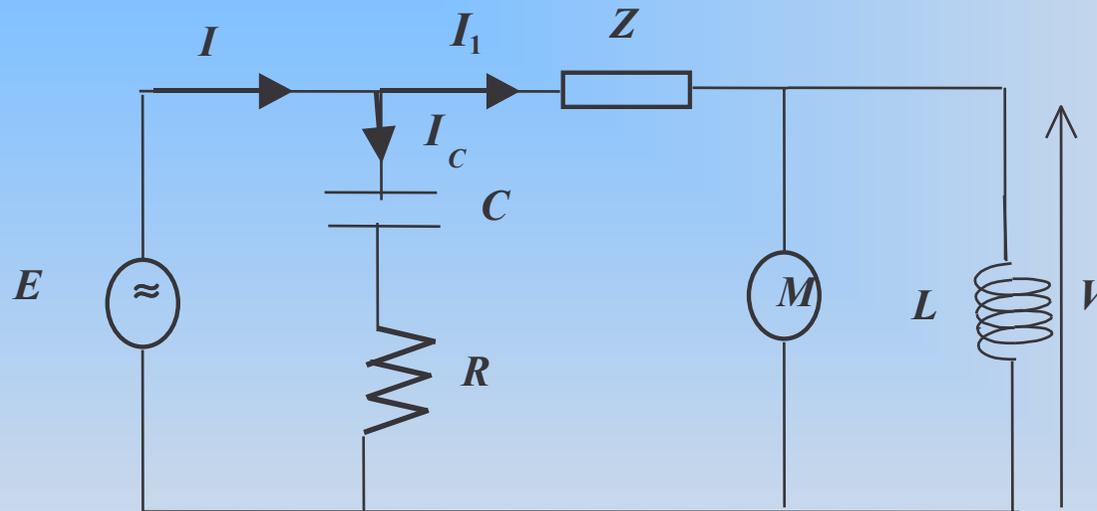
Courants triphasés équilibrés

$$L = 70mH$$

$$Z = (0.3 + j0.5)\Omega$$

$$R = 20\Omega$$

$$C = 100\mu F$$



$$P_m = 3kW$$

$$\cos \varphi_m = 0.85AR$$



5- Étude des circuits électriques triphasés

Courants triphasés équilibrés

Correction

1. Courant I_1

➤ On calcule la puissance réactive absorbée par le moteur :

$$Q_m = P_m * \operatorname{tg} \varphi_m = 1.859 \text{ kVAR} \quad \text{et} \quad \varphi_m = 31.8^\circ ; \operatorname{tg} \varphi_m = 0.62$$



5- Étude des circuits électriques triphasés

Courants triphasés équilibrés

- On calcule la puissance apparente absorbée par le moteur et l'inductance L.

$$P = P_m = 3kW$$

$$Q = Q_m + \frac{V^2}{Lw} = 4.265kVAR \quad ; \text{ avec } \frac{V^2}{Lw} = 2.406kVAR$$

$$S = \sqrt{(P^2 + Q^2)} = 5.214kVA = V * I_1$$

$$\text{d'où } I_1 = \frac{S}{V} = 22.67 A$$



5- Étude des circuits électriques triphasés

Courants triphasés équilibrés

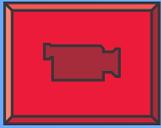
2. F. e. m E :

$$P' = P_m + rI_1^2 = 3.154kW \quad \text{et} \quad Q' = Q_m + \frac{V^2}{L\omega} + xI_1^2 = 4.522kVAR$$

$$S' = \sqrt{(P'^2 + Q'^2)} = E * I_1 = 5.51kVA \quad \text{d'où} \quad E = \frac{S'}{I_1} = 243.19V$$

3. Courant I_c

$$I_c = \frac{E}{\sqrt{R^2 + \frac{1}{(C\omega)^2}}} = 6.47A$$



5- Étude des circuits électriques triphasés

Courants triphasés équilibrés

4. Courant I débité par le générateur

➤ Puissance active totale absorbée P'' $P'' = P_m + rI^2_1 + RI_C^2 = 3.991kW$

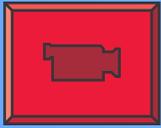
➤ Puissance réactive totale absorbée Q'' $Q'' = Q_m + \frac{V^2}{Lw} + xI_1^2 - \frac{I_C^2}{Cw} = 3.19kVAR$

Puissance apparente totale S'' $S'' = \sqrt{(P''^2 + Q''^2)} = E * I = 5.11kVA$

d'où $I = \frac{S''}{E} = 21.01A$

et donc le facteur de puissance est :

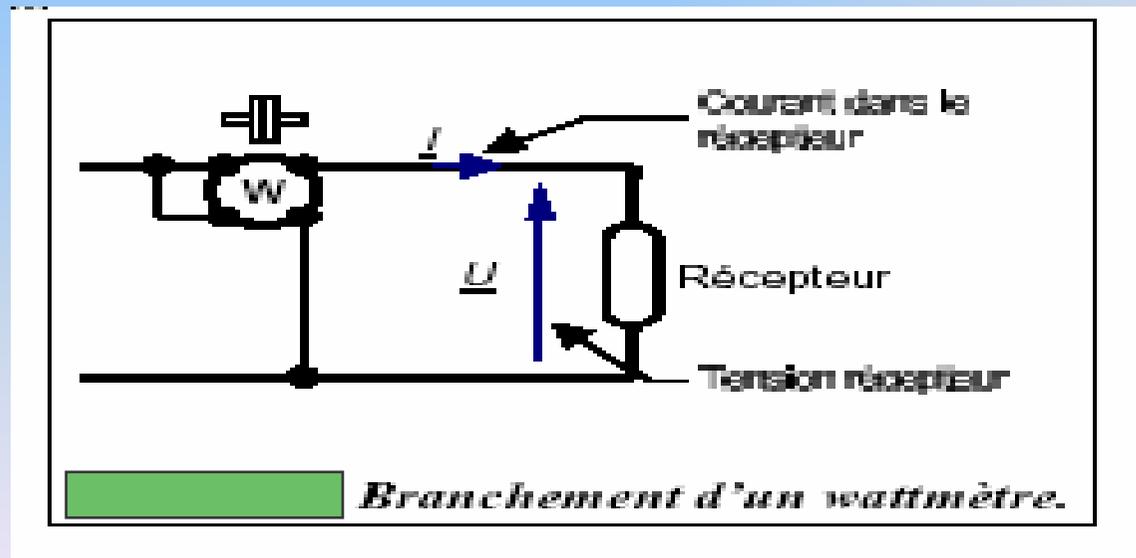
$$\cos \varphi = \frac{P''}{S''} = 0.78$$

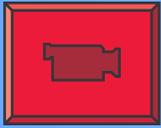


ASPECTS PRATIQUES

Courants Monophasés

Le wattmètre dispose d'un circuit courant et d'un circuit tension (donc à quatre bornes), comme l'indique la figure .





ASPECTS PRATIQUES

Courants Monophasés

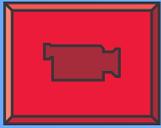
Transport de l'énergie électrique

⇨ L'objectif est le transfert d'une puissance donnée sur une distance importante en considérant une efficacité optimale.

⇨ Diminuer le plus possible les pertes à effet joule essentiellement dans la ligne

⇨ Utilisation des matériaux de faible résistivité

⇨ On diminue le courant en augmentant la tension en ligne pour une puissance donnée



ASPECTS PRATIQUES

Courants Monophasés

Symboles indiquant la nature du courant :

— courant continu.

~ courant alternatif.

⎓ courant continu et alternatif.



ASPECTS PRATIQUES

Courants Monophasés

Symboles de tensions d'épreuves diélectriques :

 Tension d'épreuve 2 kV eff. 50 Hz

si pas de chiffre : 500V par défaut.



ASPECTS PRATIQUES

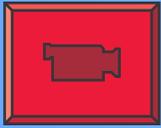
Courants Monophasés

Symbole de position :

2,5 Appareil à utiliser avec le cadran vertical.


1,5 Appareil à utiliser avec le cadran horizontal.


1,5 Appareil à utiliser avec le cadran à 60°,
 par rapport au plan horizontal.



ASPECTS PRATIQUES

Courants Monophasés

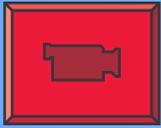
(1) **Symbole de fréquence :** (situés au-dessous des symboles \sim ou \approx) indiquant la nature du courant.



50 Hz

ou

30... 5000 Hz (plage).



ASPECTS PRATIQUES

Courants Monophasés

Symboles indiquant le principe de l'appareil :



Appareil magnétoélectrique.

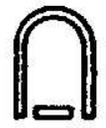


Appareil ferromagnétique.

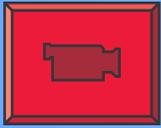


Appareil magnétoélectrique avec shunt extérieur et chute de tension correspondante.

50mV



Appareil magnétoélectrique à redresseur.



ASPECTS PRATIQUES

Courants Monophasés

(2) **Symboles de classe** : (situés au-dessus des symboles de position)

2,5 - 1,5 - 1 - 0,5.

Symboles de réglage du zéro :



Dispositif de réglage du zéro pouvant être manipulé sous tension.



Métrologie

Pour pouvoir effectuer le mesurage d'une grandeur physique (mesurande), il est nécessaire d'associer un nombre à chacun de ses états (la mesure).

Le mesurage :

L'ensemble d'opérations ayant pour but de déterminer une valeur d'une grandeur.

La mesurande :

La grandeur particulière soumise à mesurage. Exemple : L'intensité du courant électrique

La mesure (x) :

C'est l'évaluation d'une grandeur par comparaison avec une autre grandeur de même nature prise pour unité. Exemple : 2 Ampères.

Symboles

Symboles indiquant la nature du courant :

- courant continu.
- (1)  courant alternatif.
- (1)  courant continu et alternatif.

Symboles de tensions d'épreuves diélectriques :

 Tension d'épreuve 2 kV eff. 50 Hz
si pas de chiffre : 500V par défaut.

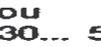
(2) Symbole de position :

 2,5 Appareil à utiliser avec le cadran vertical.

 1,5 Appareil à utiliser avec le cadran horizontal.

 1,5 Appareil à utiliser avec le cadran à 60°, par rapport au plan horizontal.

(1) Symbole de fréquence : (situés au-dessous des symboles  ou ) indiquant la nature du courant.

 50 Hz
 ou
 30... 5000 Hz (plage).

Symboles relatifs au panneau de montage :

Fe panneau magnétique

NFe panneau non magnétique

FeNFe aimant blindé, panneau magnétique ou non magnétique

Symboles indiquant le principe de l'appareil :

 Appareil magnétoélectrique.

 Appareil magnétoélectrique avec shunt extérieur et chute de tension correspondante.

 Appareil magnétoélectrique à redresseur.

 Appareil magnétoélectrique à redresseur et transformateur de courant incorporé.

 Appareil ferromagnétique.

 Voir notice particulière.

 Thermocouple non isolé pour mesures des valeurs efficaces.

 Thermocouple isolé

Symboles de protection :

 Protection magnétique : un cercle entoure le symbole indiquant le principe de l'appareil.

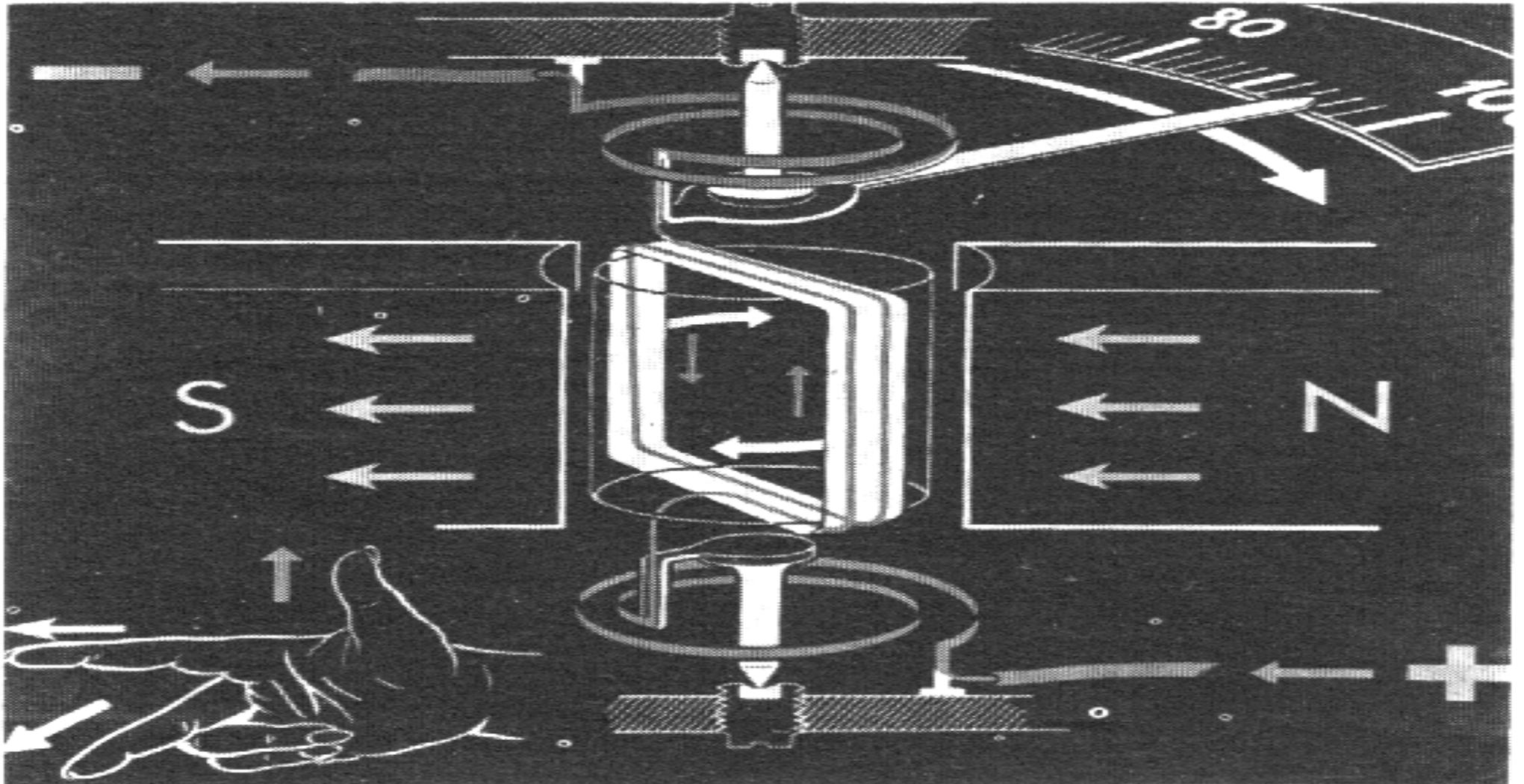
Symboles de réglage du zéro :

 Dispositif de réglage du zéro pouvant être manipulé sous tension.

(2) Symboles de classe : (situés au-dessus des symboles de position)
 2.5 - 1.5 - 1 - 0.5.

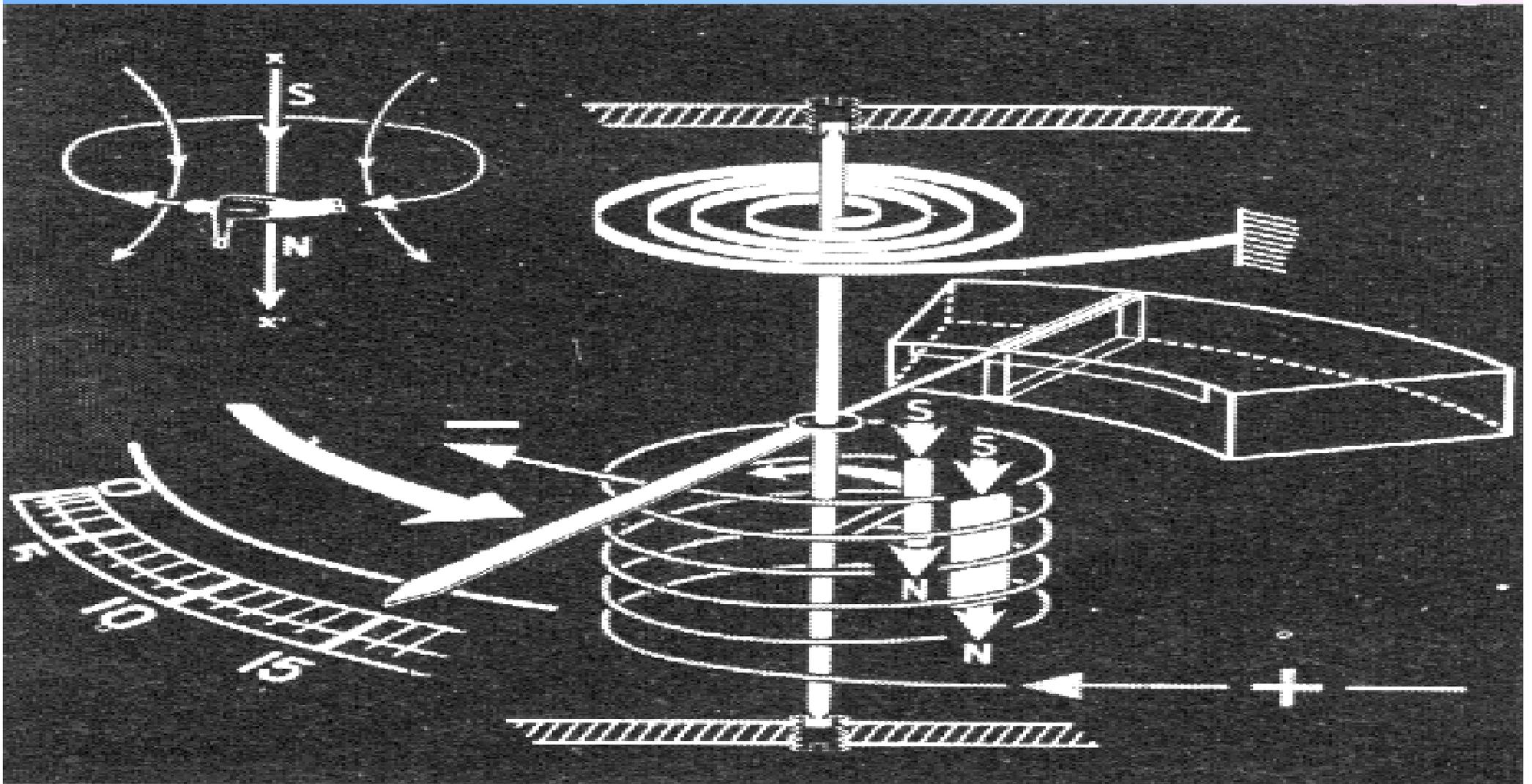
-
-
-

Appareil magnétoélectrique

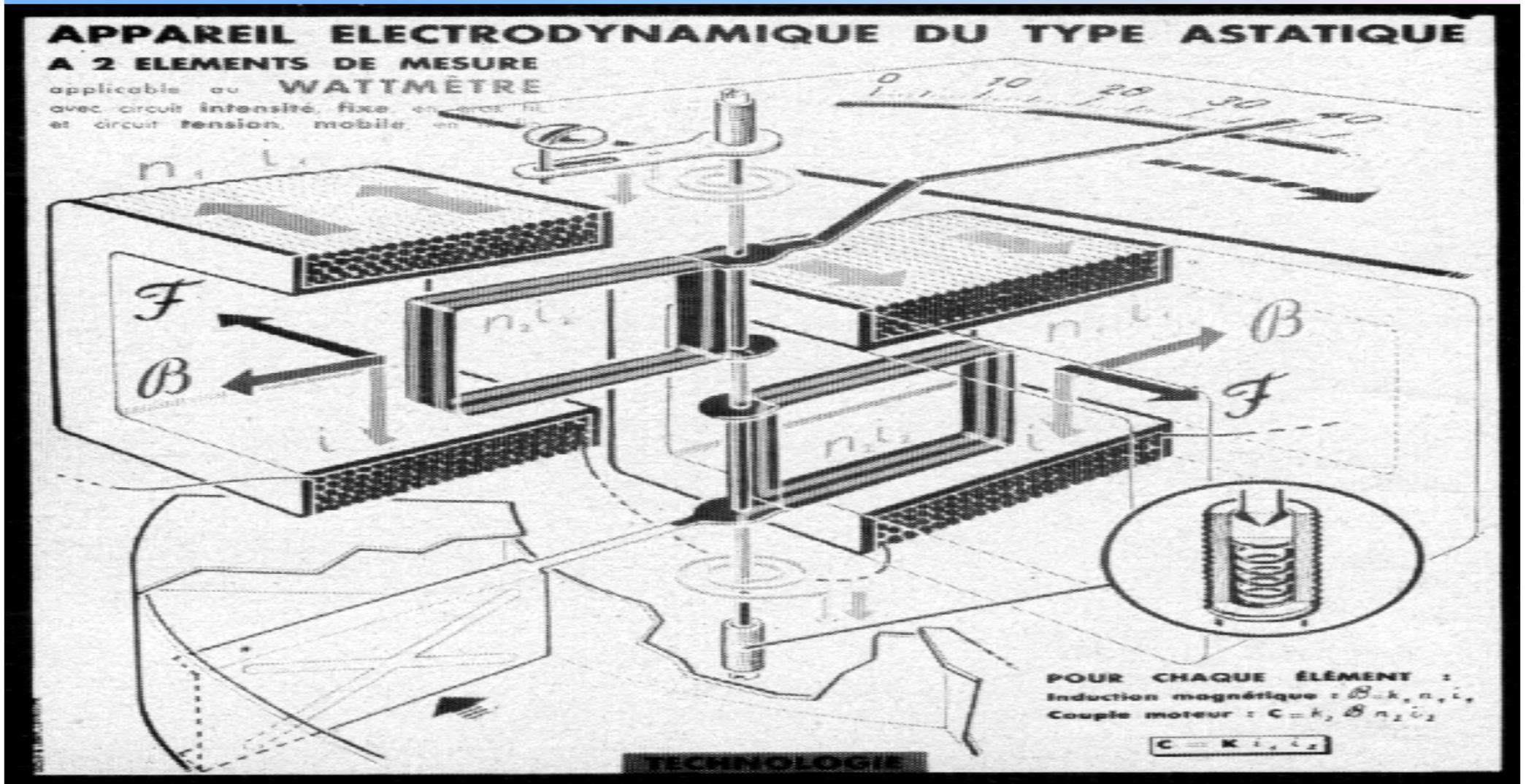


-
-
-

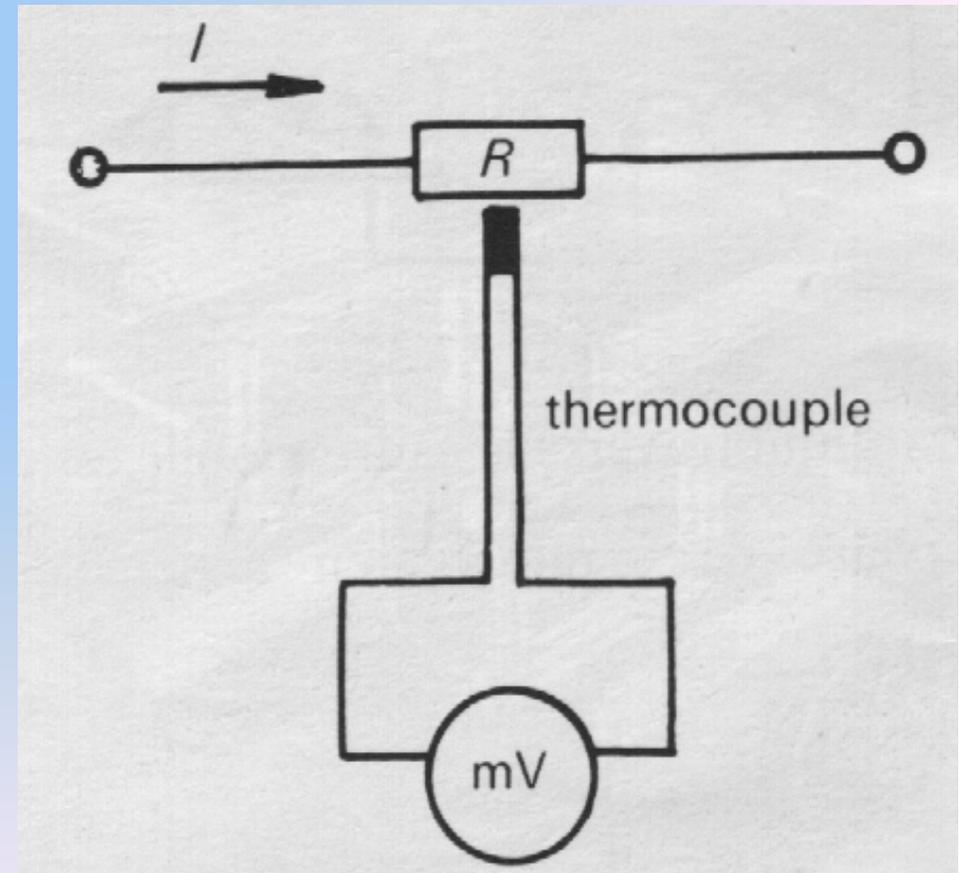
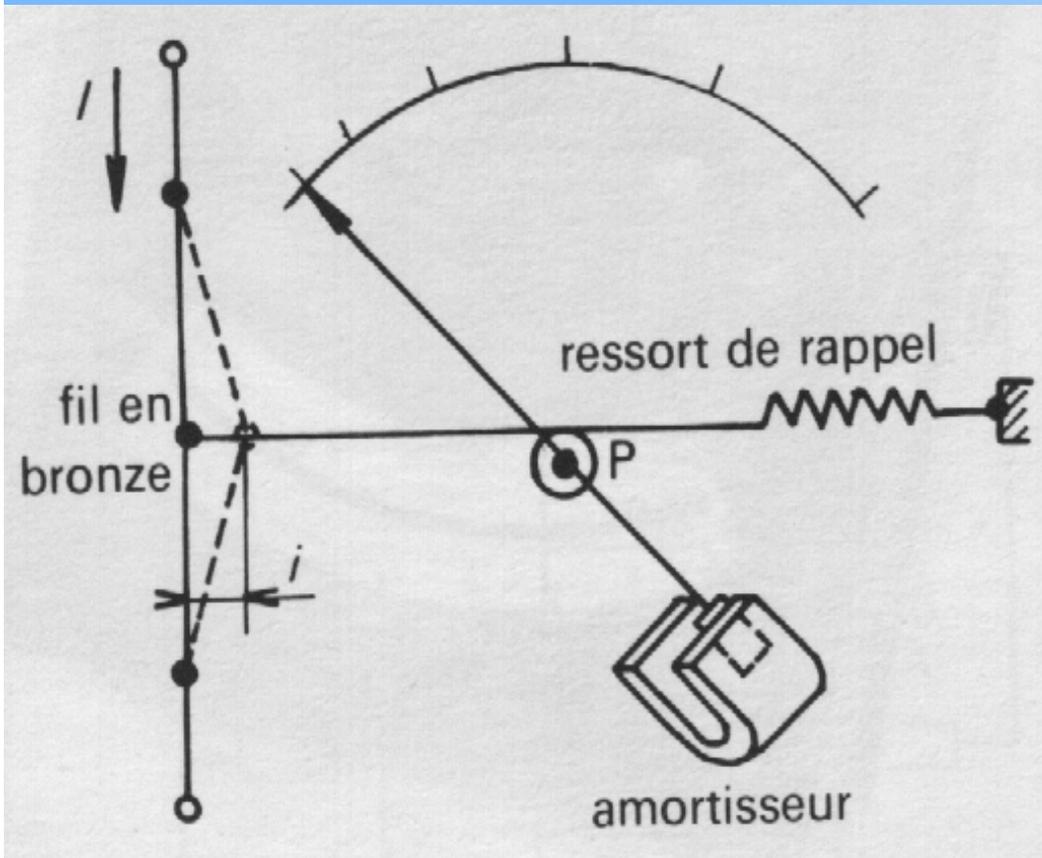
Appareil ferromagnétique



Appareil électrodynamique



Appareil à thermocouple



-
-
-

Transformateurs d'intensité



LEM

-
-
-

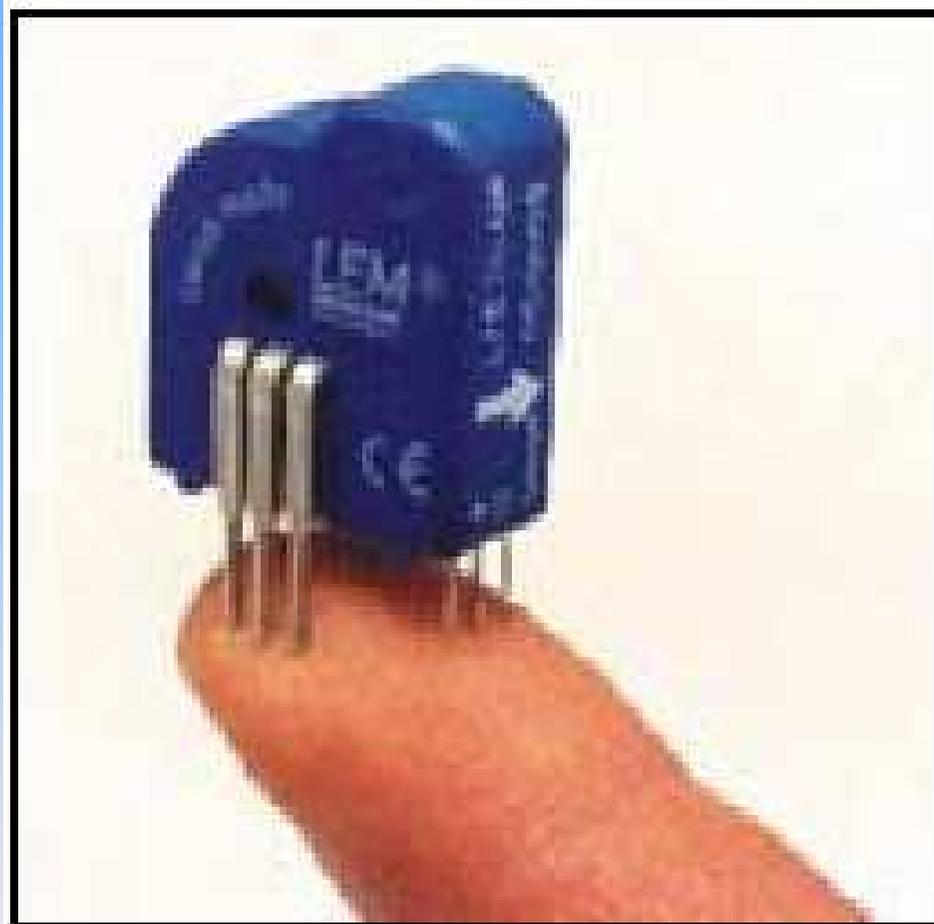
Transformateurs d'intensité



-
-
-
-
-
-
-
-
-

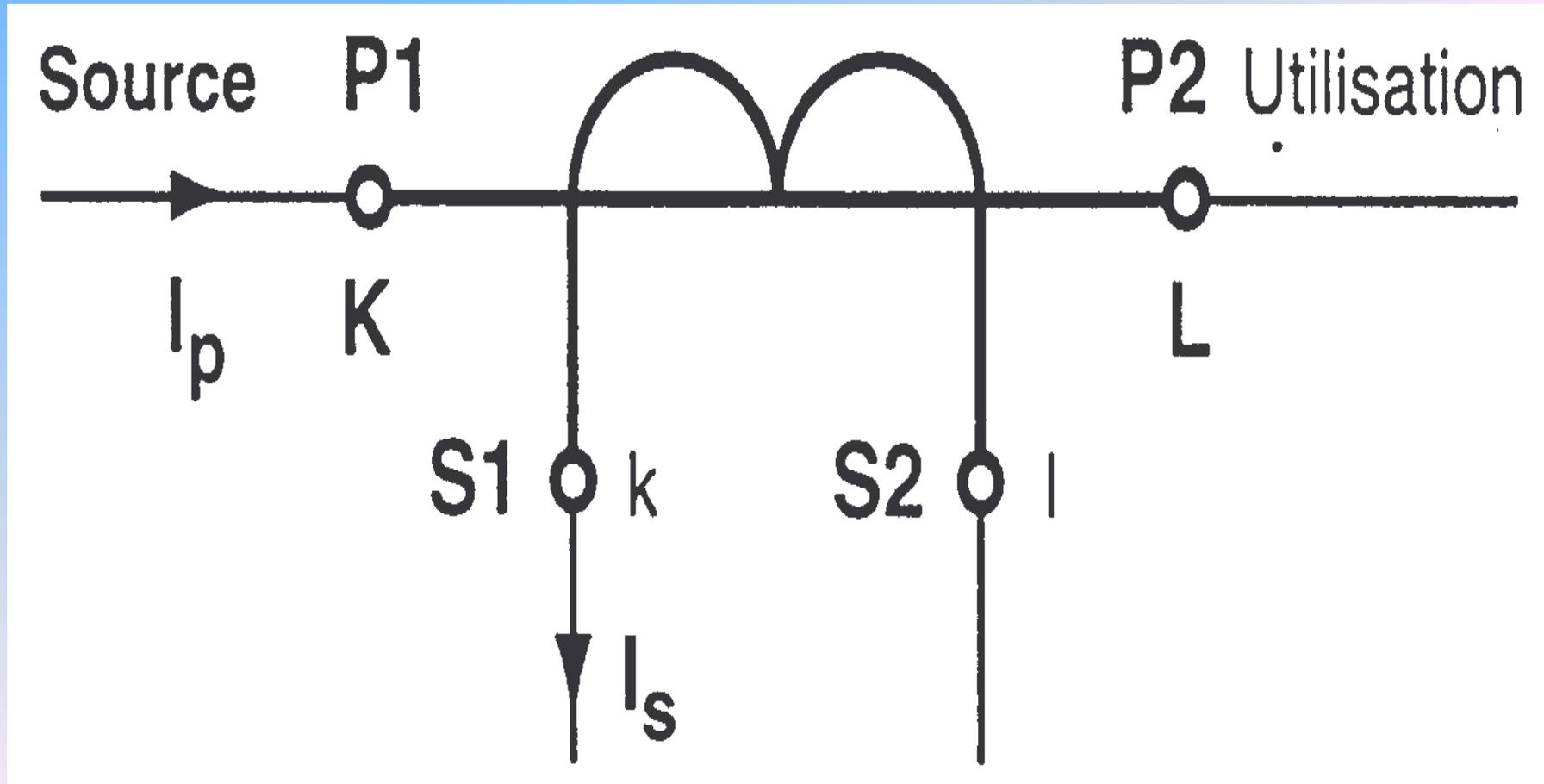
-
-
-

Transformateurs d'intensité



Le capteur compact LTS 25-NP.

Transformateurs d'intensité

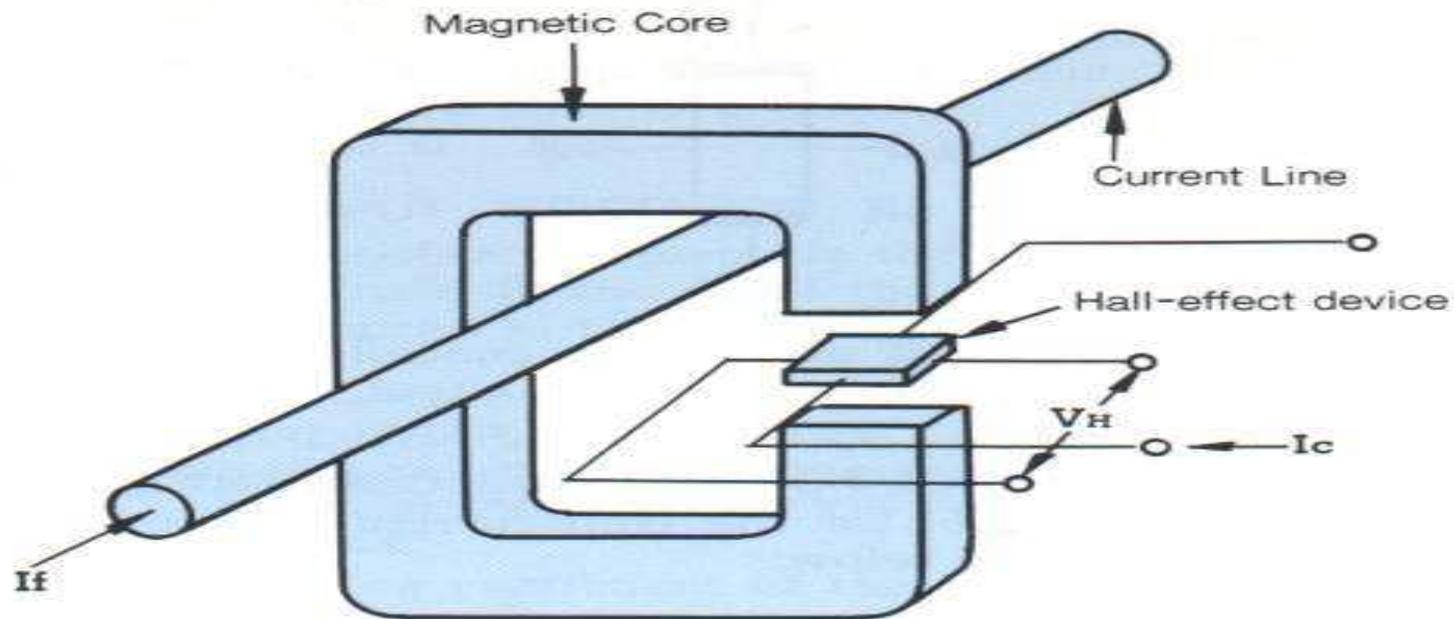


-
-
-

Sonde à effet Hall

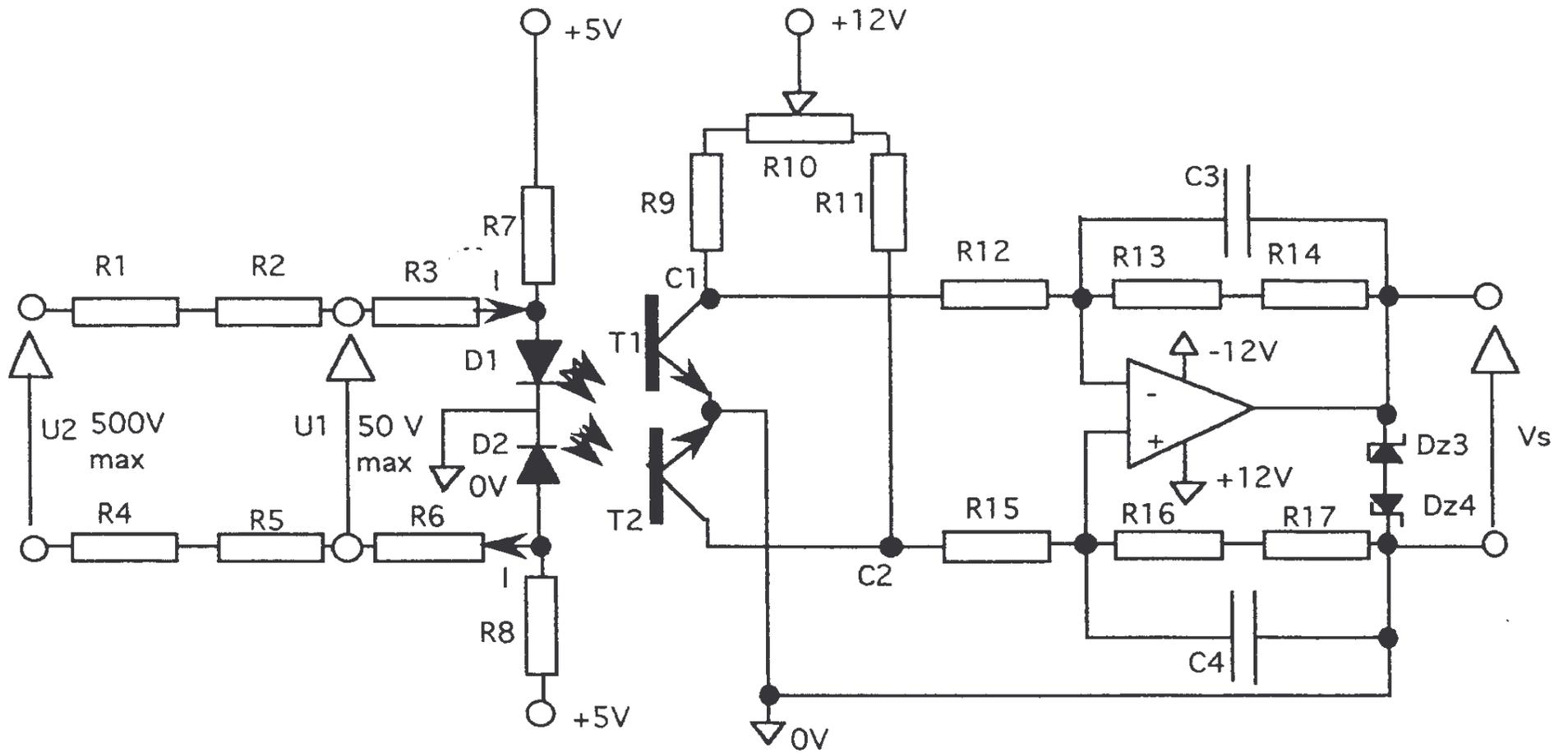
1.2 HALL CURRENT SENSOR

Hall current sensors have a simple structure consisting of a gapped magnetic core and a Hall-effect device placed in the gap in the magnetic core as shown in



Schematic Representation of a Hall Current Sensor

Sonde différentielle



-
-
-

Shunt-basse fréquence ou continu

