Electricité appliquées

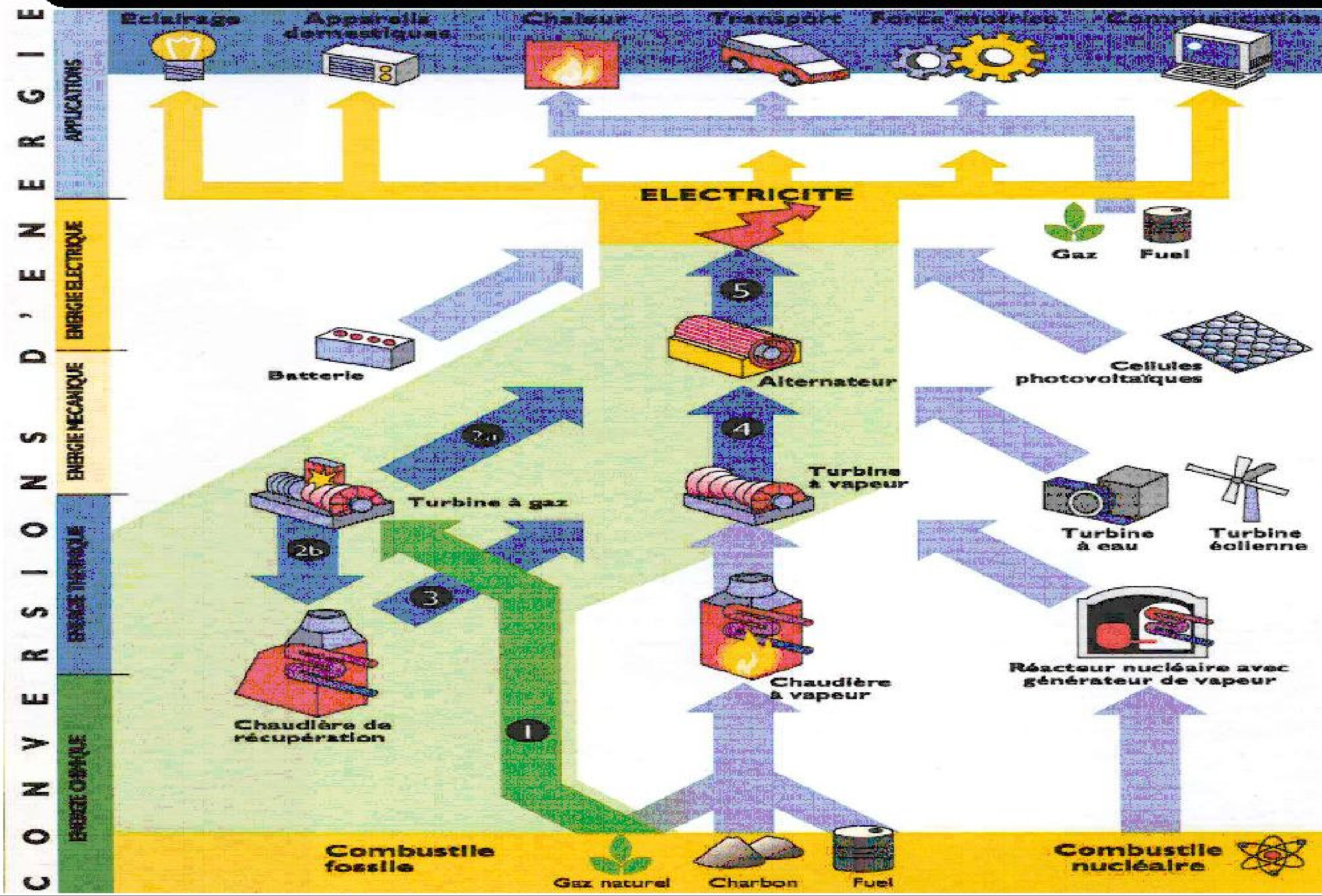
24h cours + 24h labos

Prof. J.-C. MAUN

Applications industrielles de l'électricité

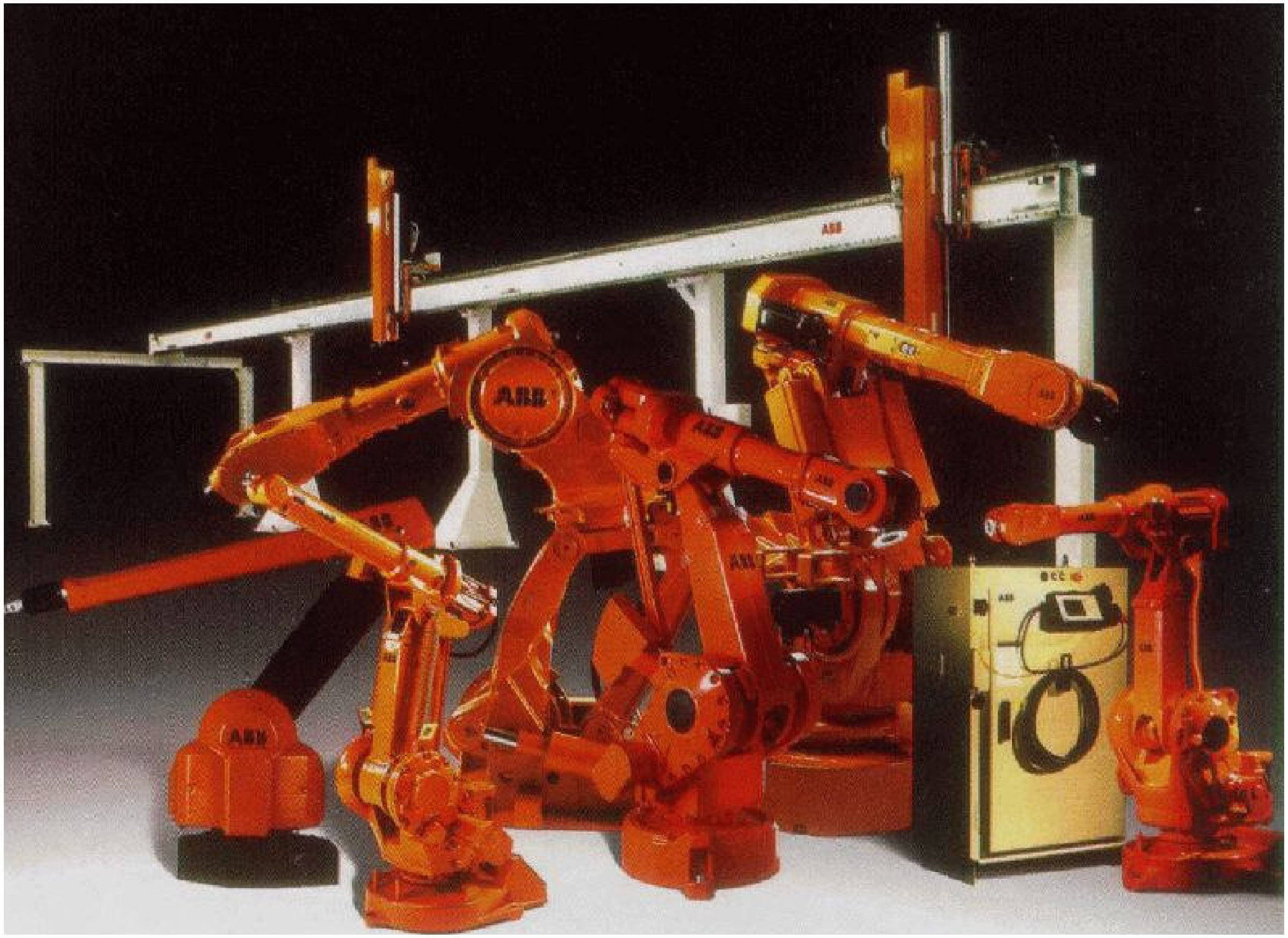
1. Le triphasé
2. Machines électriques - Généralités
3. Le transformateur
4. La machine à courant continu
5. Le moteur asynchrone
6. (Distribution de l'énergie électrique)

L'électricité est une énergie secondaire



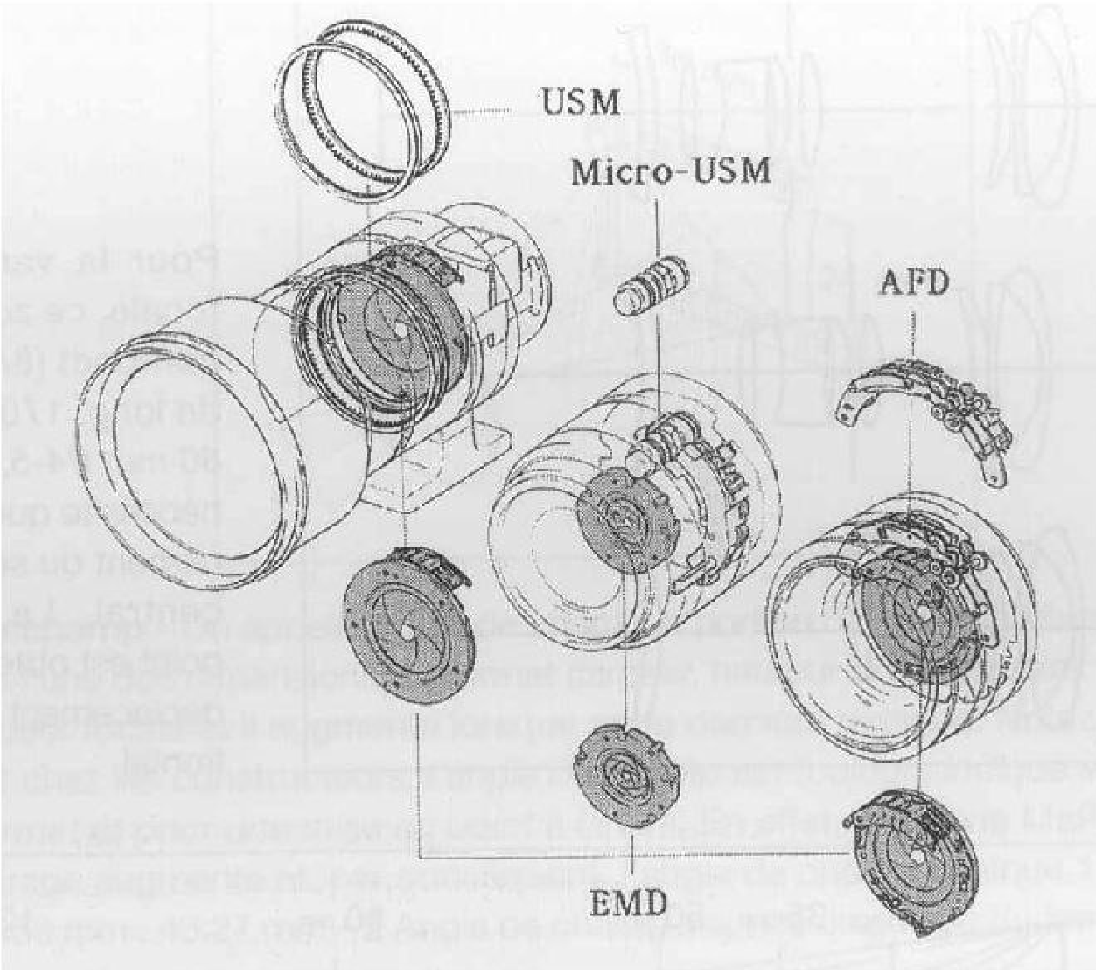
Une machine électrique ...

D’ autres machines électriques ...

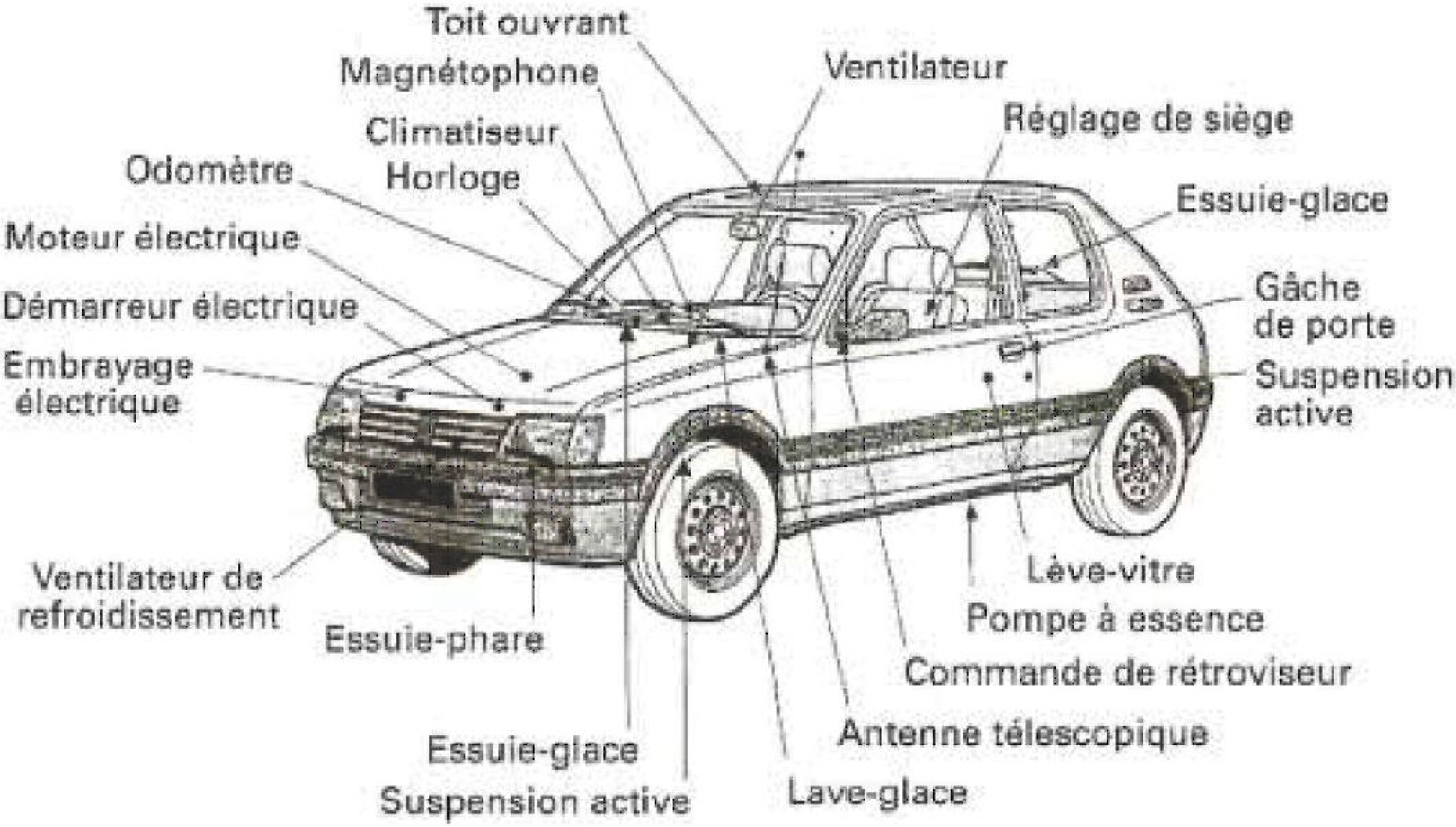


Encore d'autres machines électriques ...

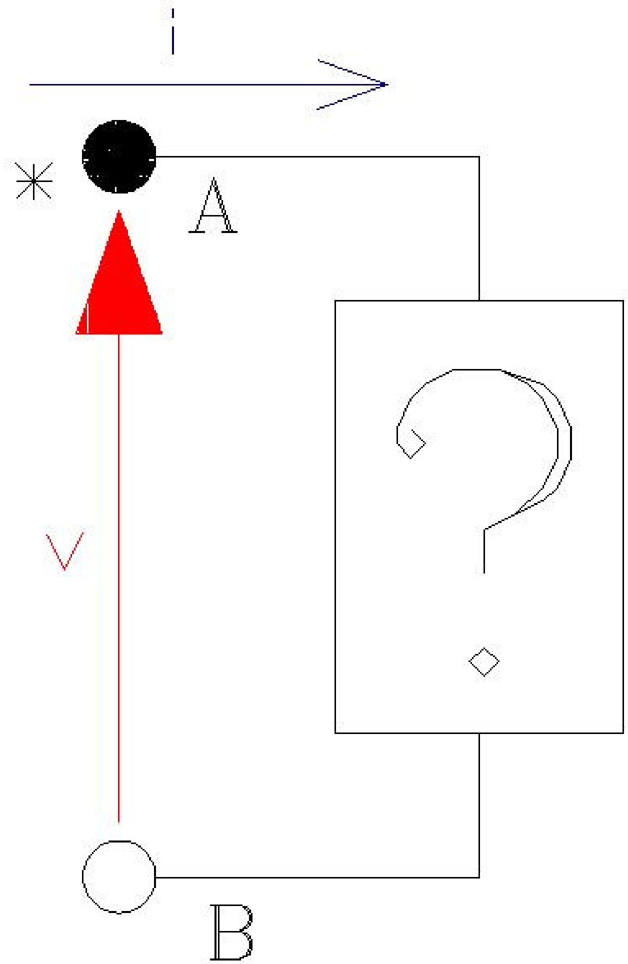
Et toujours des machines électriques.



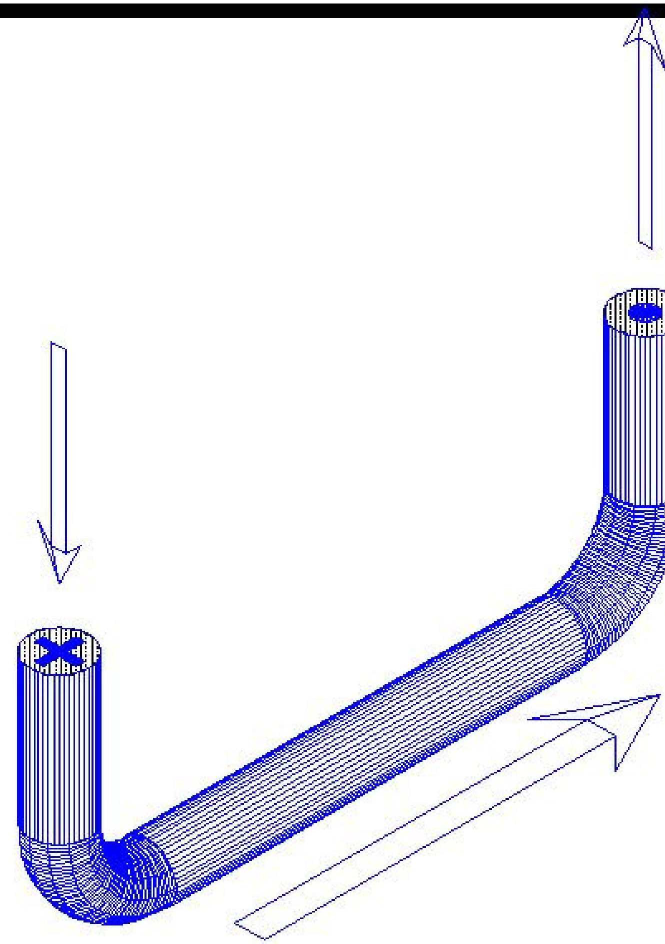
Et toujours des machines électriques.



Conventions : récepteur



Conventions : sens du courant



Notations

$a = a(t)$	:	valeur instantanée
$\underline{a}(t)$	:	valeur instantanée complexe
	:	vecteur tournant dont la projection sur un axe de référence fournit la valeur instantanée d'une grandeur cosinusoïdale de pulsation ω
	:	$a(t) = \mathbb{R}e(\underline{a}(t))$
$\underline{A} = A \angle \alpha$	:	nombre complexe de module A et d'argument α. Le plus fréquemment, $\underline{A}$ désigne un <u>phaseur</u> de valeur efficace A tel que $\underline{a} = \underline{A}\ \sqrt{2}\ e^{j\omega t}$
A_M	:	valeur de crête ou maximale dans le temps : $A_M = A\ \sqrt{2}$
$\bar{A}$	:	vecteur spatial de module A
A^M	:	valeur maximale d'une grandeur variant dans l'espace
i_{AB}	:	courant circulant de A vers B (flèche de A vers B)
$v_{BA} = v_A - v_B$	:	potentiel de A par rapport à B (flèche de B vers A)

Fonction sinusoïdale du temps

Une grandeur fonction sinusoïdale du temps, de pulsation ω (par exemple une tension), se représente par

$$\begin{aligned} v &= V_M \cos(\omega t + \xi_V) \qquad \textit{où } V_M \textit{ est la valeur de crête} \\ &= V\sqrt{2}\cos(\omega t + \xi_V) \quad \textit{où } V \textit{ est la valeur efficace} \end{aligned}$$

On peut encore écrire :

$$\begin{aligned} v &= \mathbf{Re}\left(V\sqrt{2}\cos(\omega t + \xi_V) + j\,V\sqrt{2}\sin(\omega t + \xi_V)\right) \\ &= \mathbf{Re}\left(V\sqrt{2}\,e^{j(\omega t + \xi_V)}\right) \end{aligned}$$

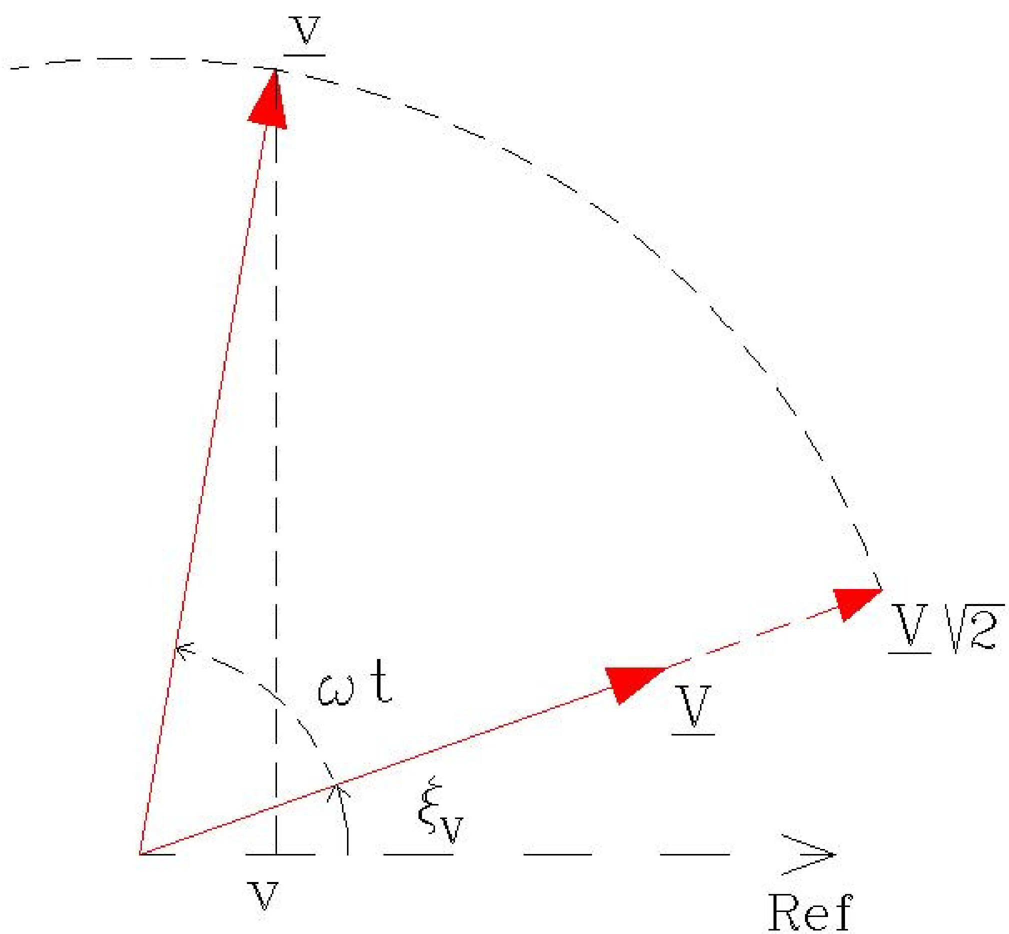
On définit une **valeur instantanée complexe** $\underline{v}$ par

$$\begin{aligned} \underline{v} &= V\sqrt{2}\,e^{j(\omega t + \xi_V)} \\ &= V e^{j\xi_V}\sqrt{2}\,e^{j\omega t} \end{aligned}$$

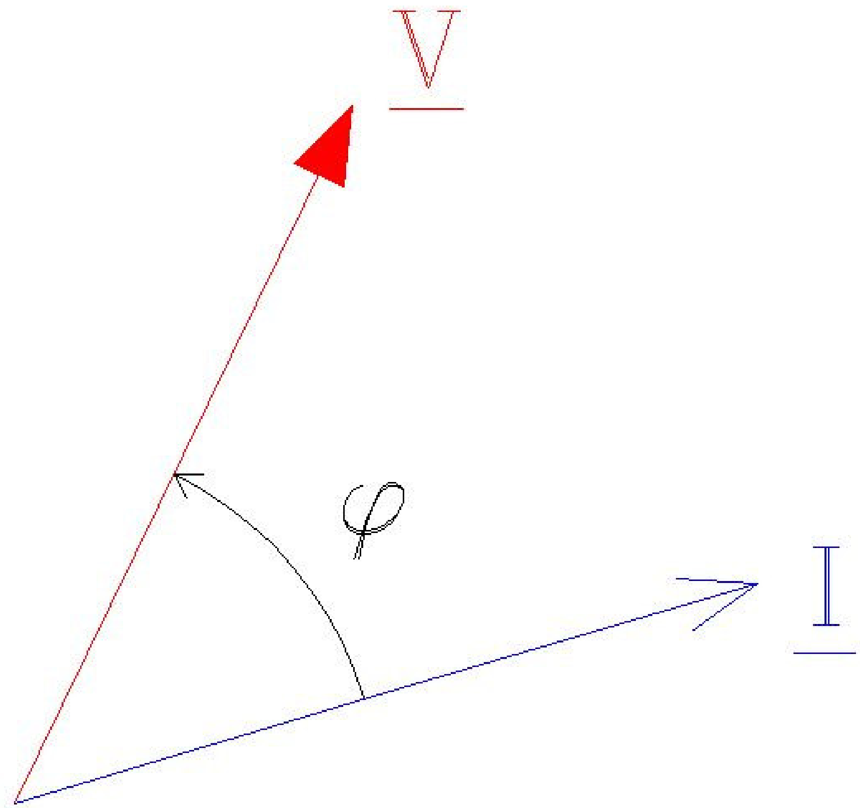
et le phaseur $\underline{V}$ *par*

$$\underline{V} = V e^{j\xi_V}$$

Phaseur - Valeur instantanée complexe

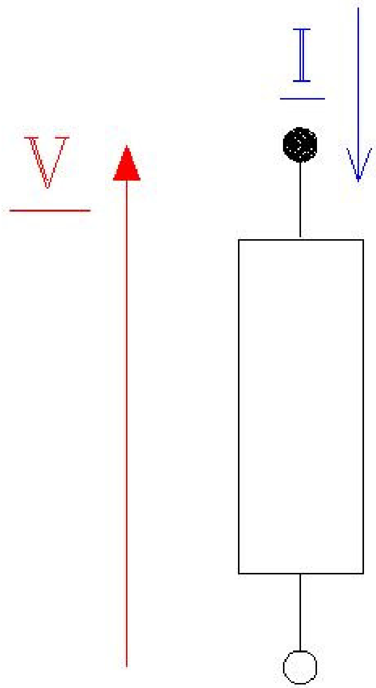


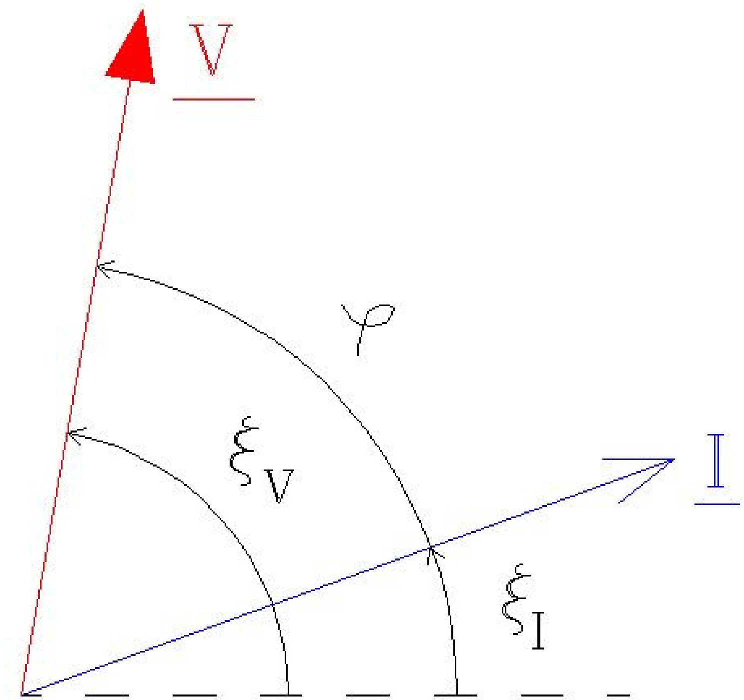
Angle de charge



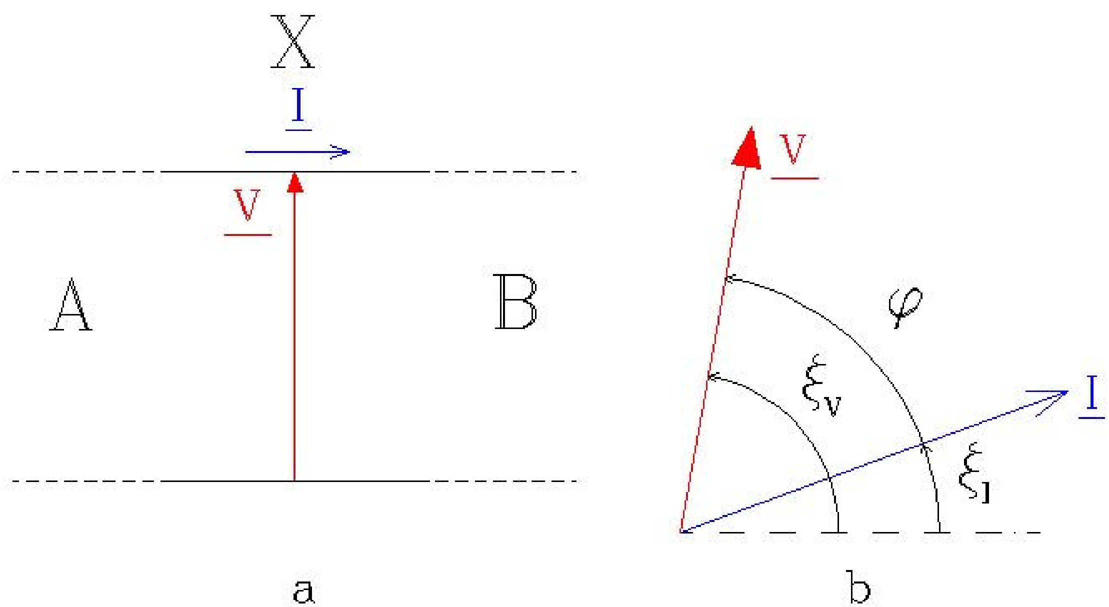
... du courant vers la tension ...

Impédance $\underline{Z} = Z\angle\zeta$



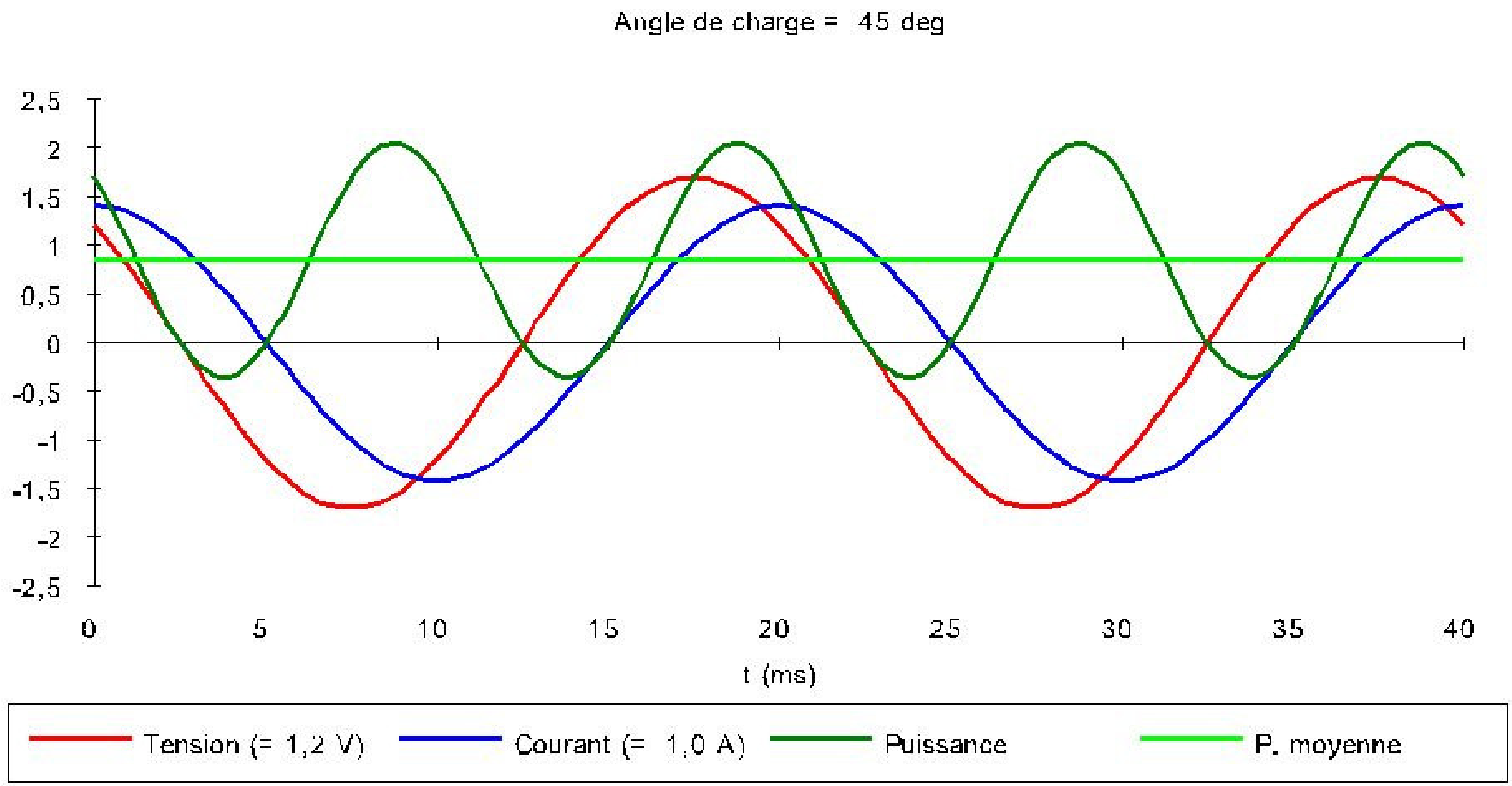


Puissance active

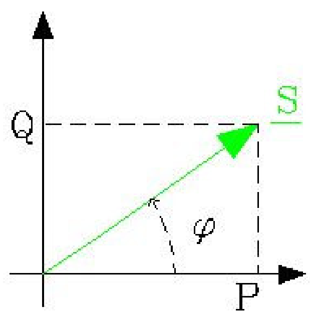


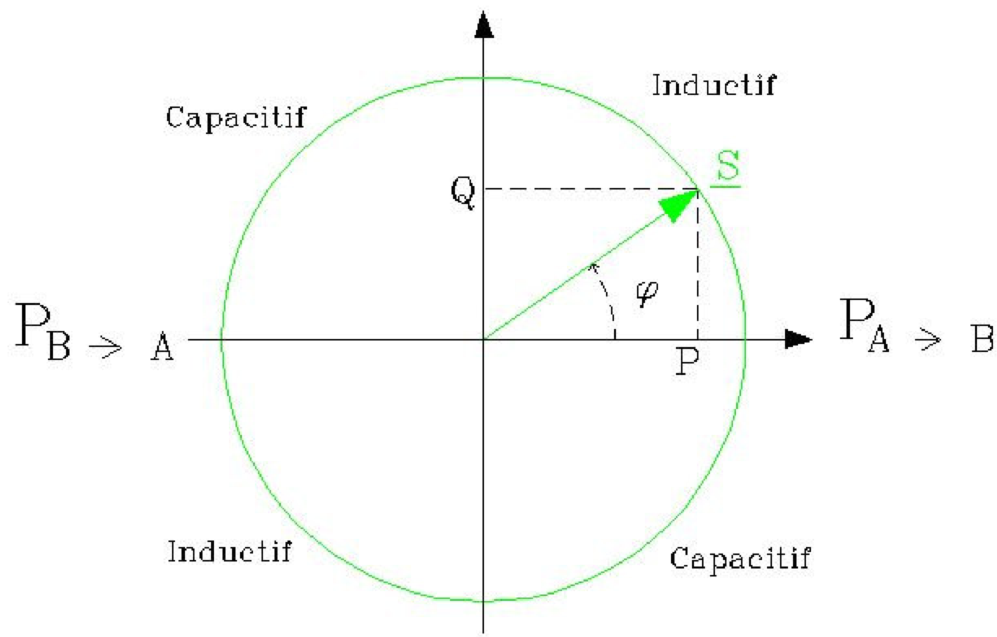
$$
\begin{aligned}
p &= v\ i \\
&= V_M\ I_M\ \cos(\omega t + \xi_V)\ \cos(\omega t + \xi_I) \\
&= \frac{V_M\ I_M}{2}\left(\cos(\xi_V - \xi_I) + \cos(2\ \omega t + \xi_V + \xi_I)\right) \\
&= V\ I\ \cos\ \varphi + V\ I\ \cos(2\ \omega t + \xi_V + \xi_I)
\end{aligned}
$$

Puissance instantanée (φ=45°)

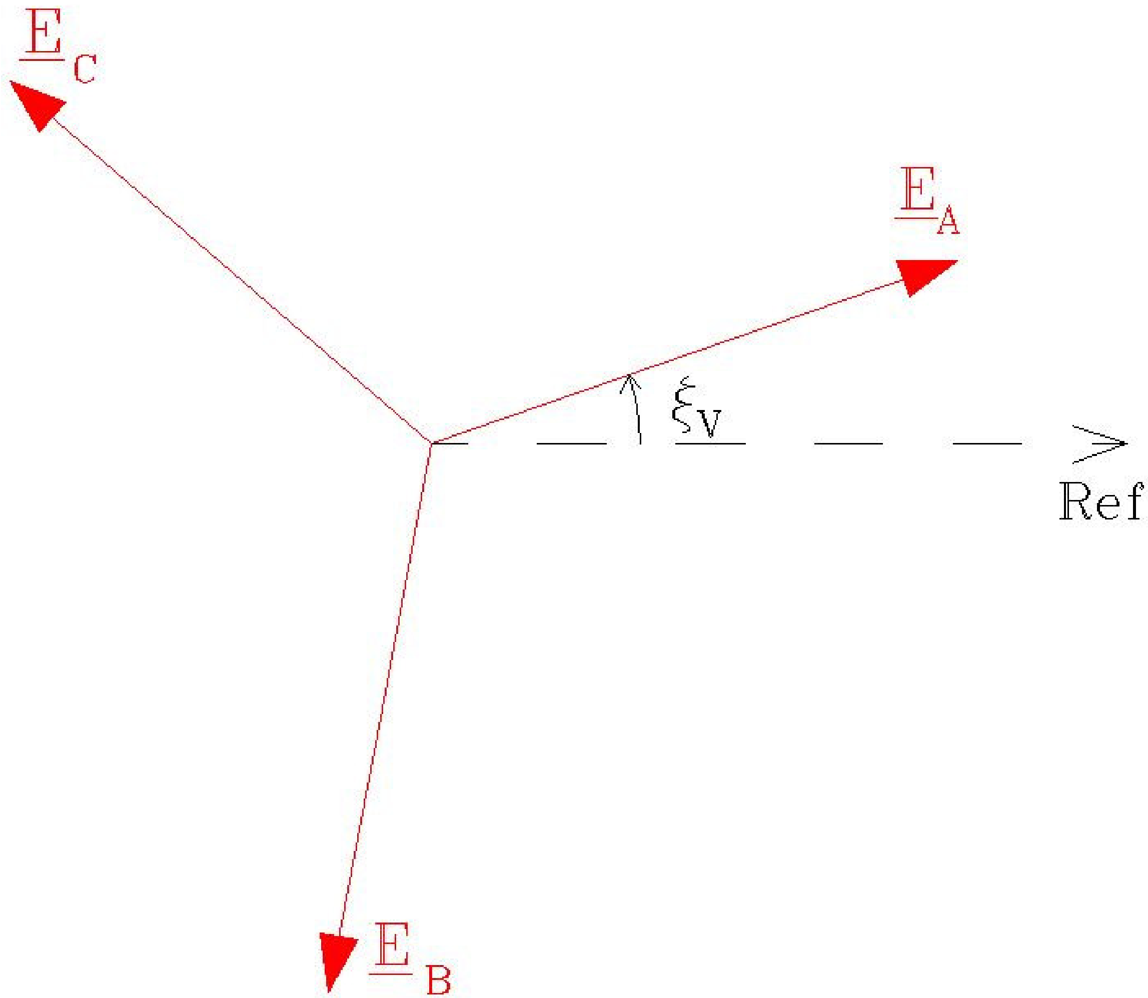


Puissance apparente



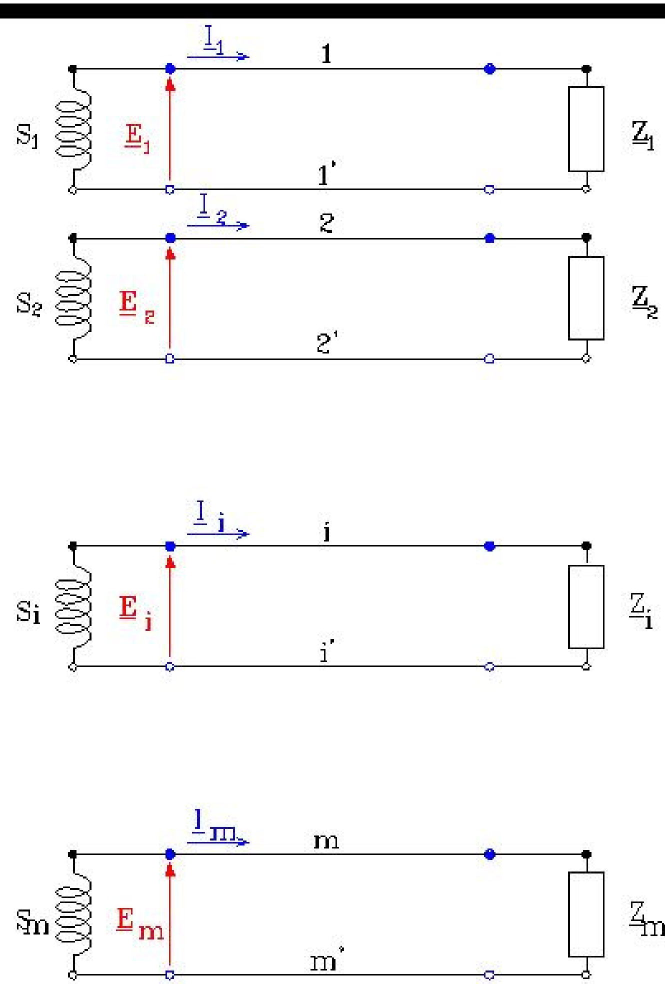


Le triphasé

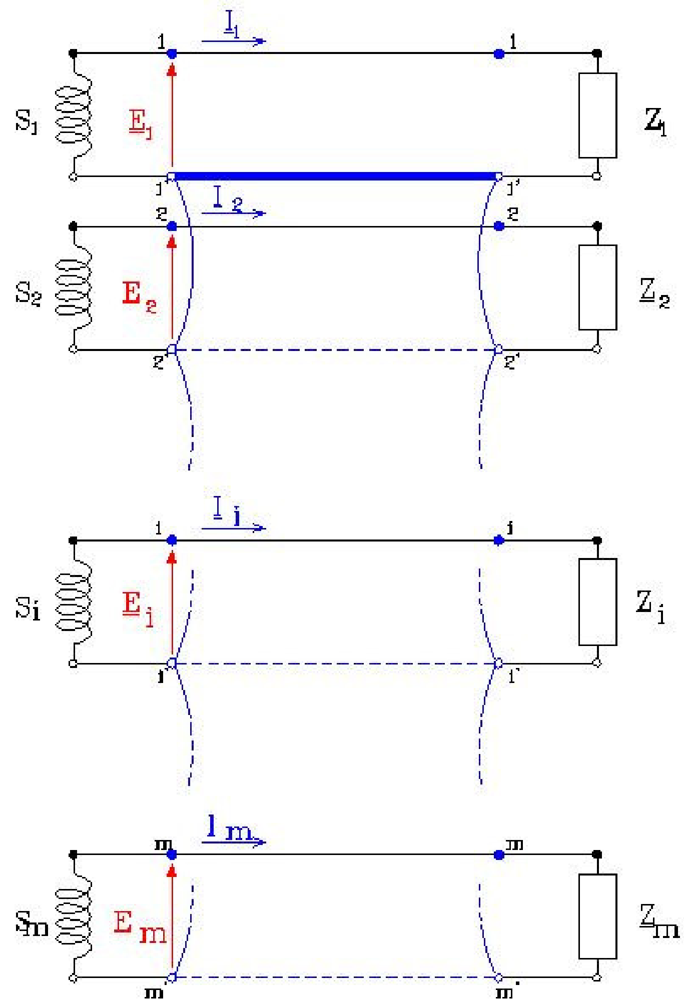


$\underline{\mathbb{E}}_C$
$\underline{\mathbb{E}}_A$
ξ_V
$\mathbb{R}$ef
$\underline{\mathbb{E}}_B$

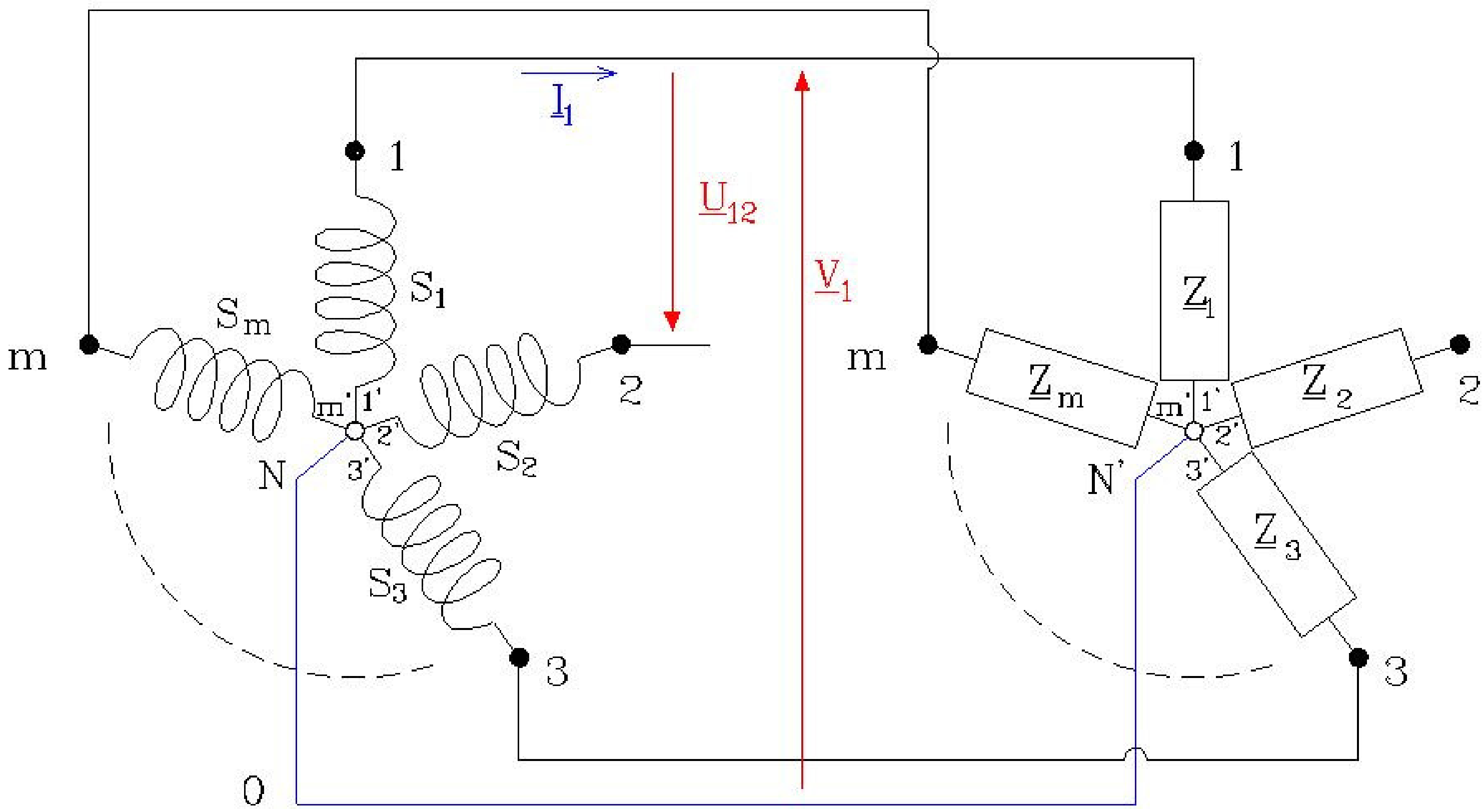
m circuits indépendants



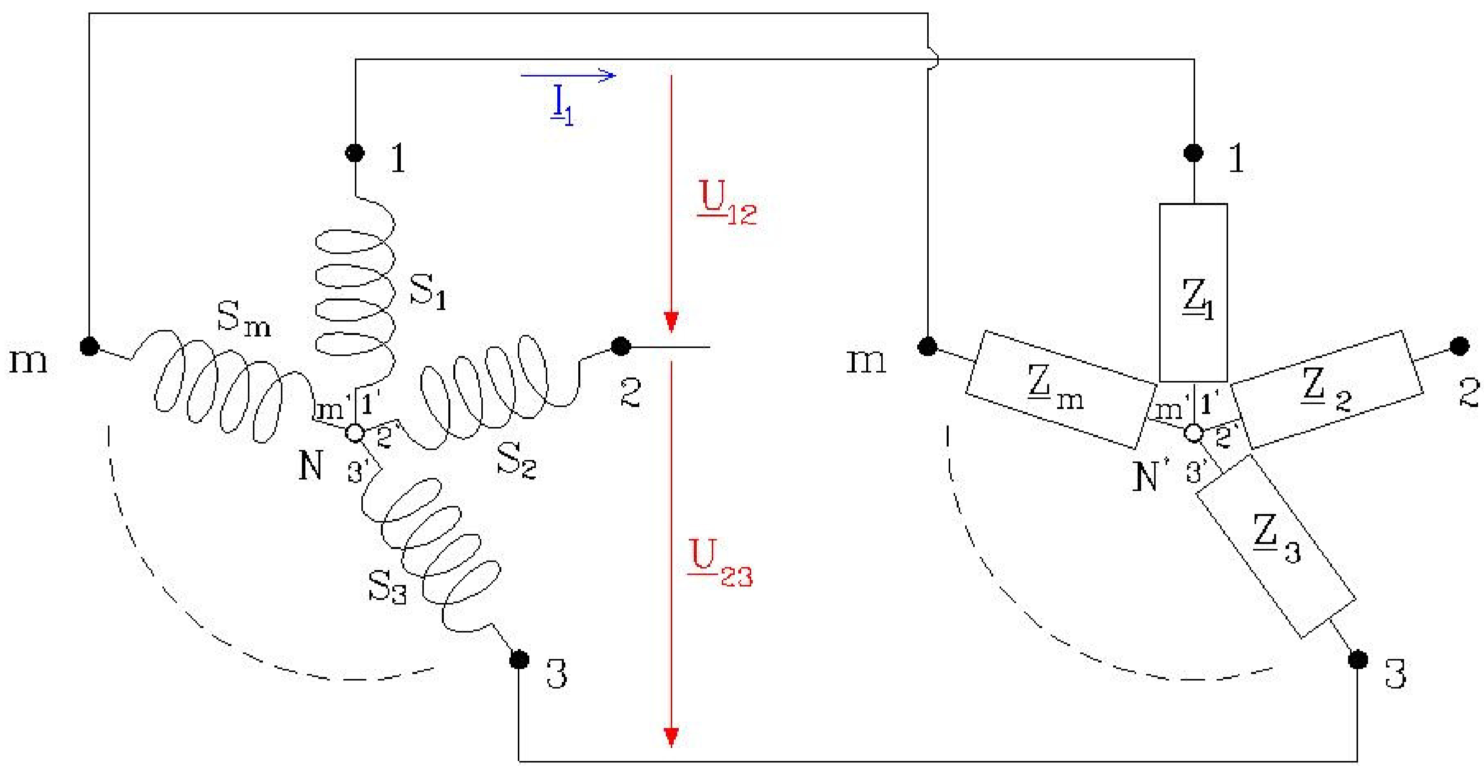
Couplage en étoile



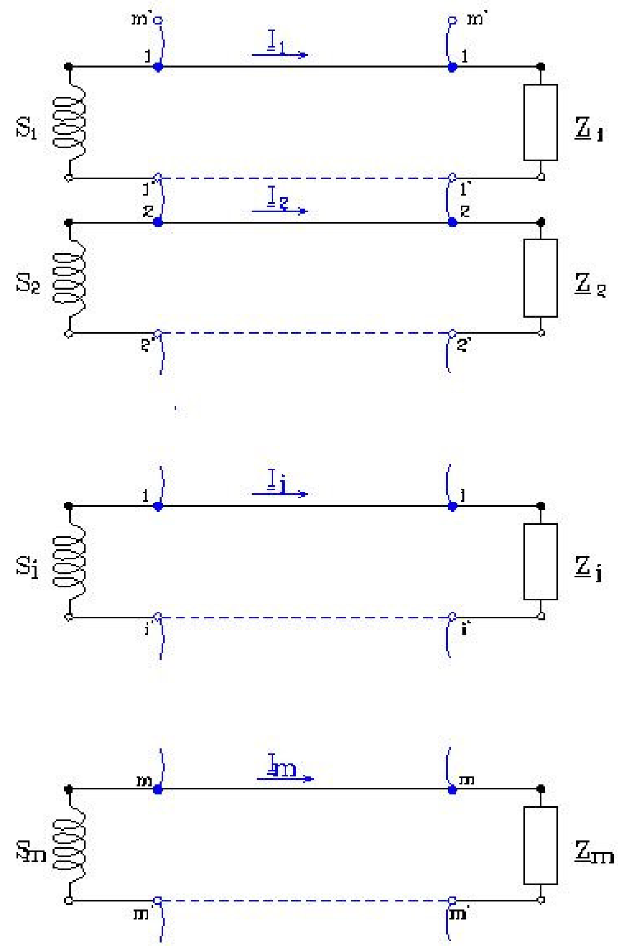
Couplage en étoile AVEC neutre



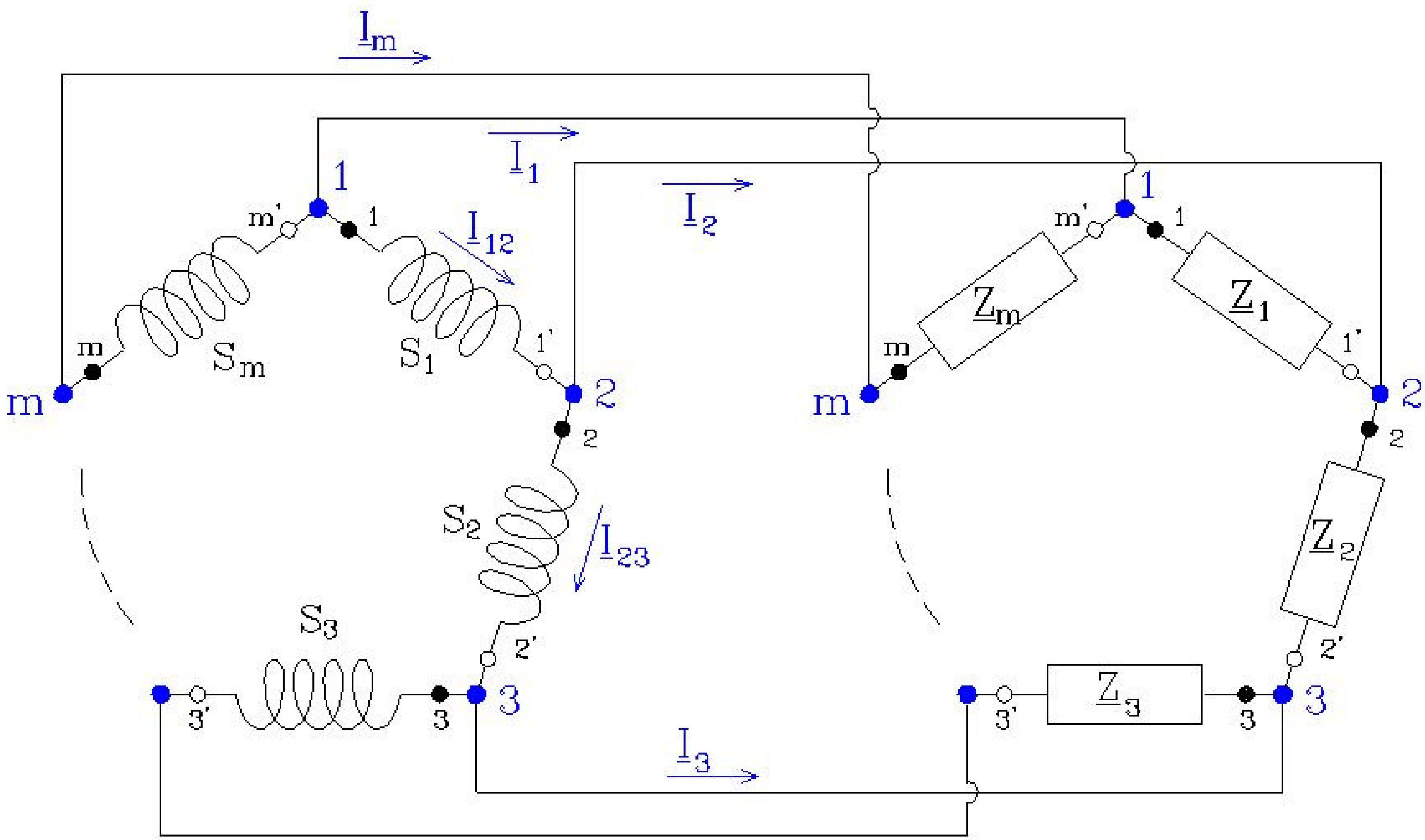
Couplage en étoile SANS neutre



Couplage en polygone

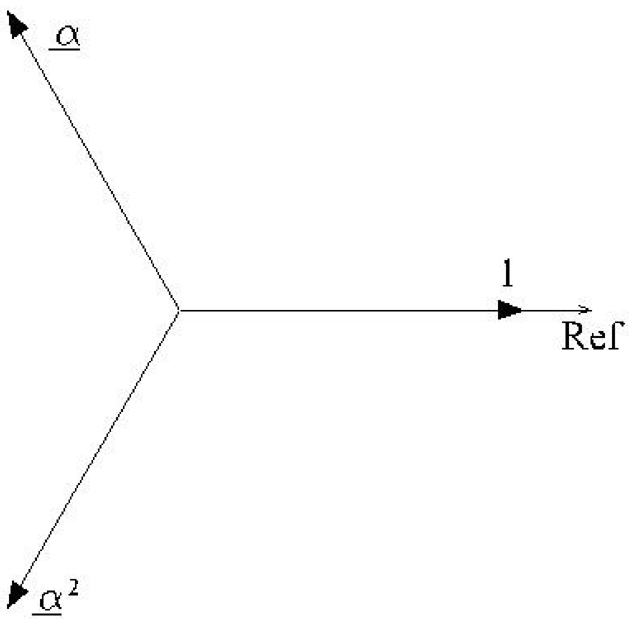


Couplage en polygone



L'opérateur $\underline{\alpha}$ de déphasage

$$\underline{\alpha} = \angle\frac{2\pi}{3} = -\frac{1}{2} + j\,\frac{\sqrt{3}}{2}$$



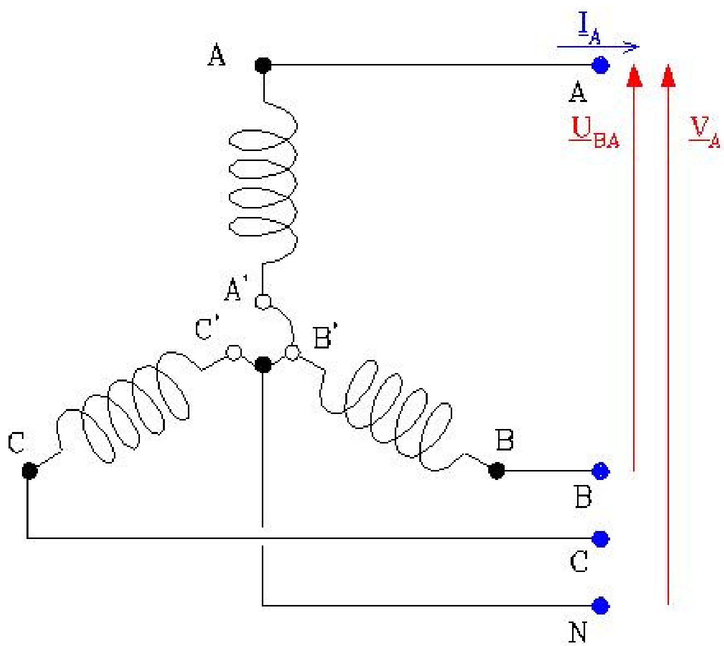
$$1 + \underline{\alpha} + \underline{\alpha}^2 = 0 \quad ; \quad \underline{\alpha}^* = \underline{\alpha}^2 \quad ; \quad \left(\underline{\alpha}^2\right)^* = \underline{\alpha}$$

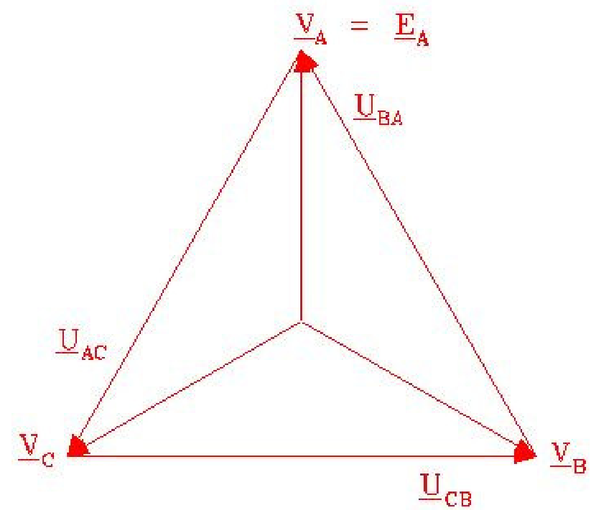
$$1 + \underline{\alpha} = -\underline{\alpha}^2 = \angle\frac{\pi}{3} \quad ; \quad 1 - \underline{\alpha} = \sqrt{3}\,\angle-\frac{\pi}{6}$$

$$\underline{\alpha} + \underline{\alpha}^2 = -1 = \angle\pi \quad ; \quad \underline{\alpha} - \underline{\alpha}^2 = \sqrt{3}\,\angle-\frac{\pi}{2}$$

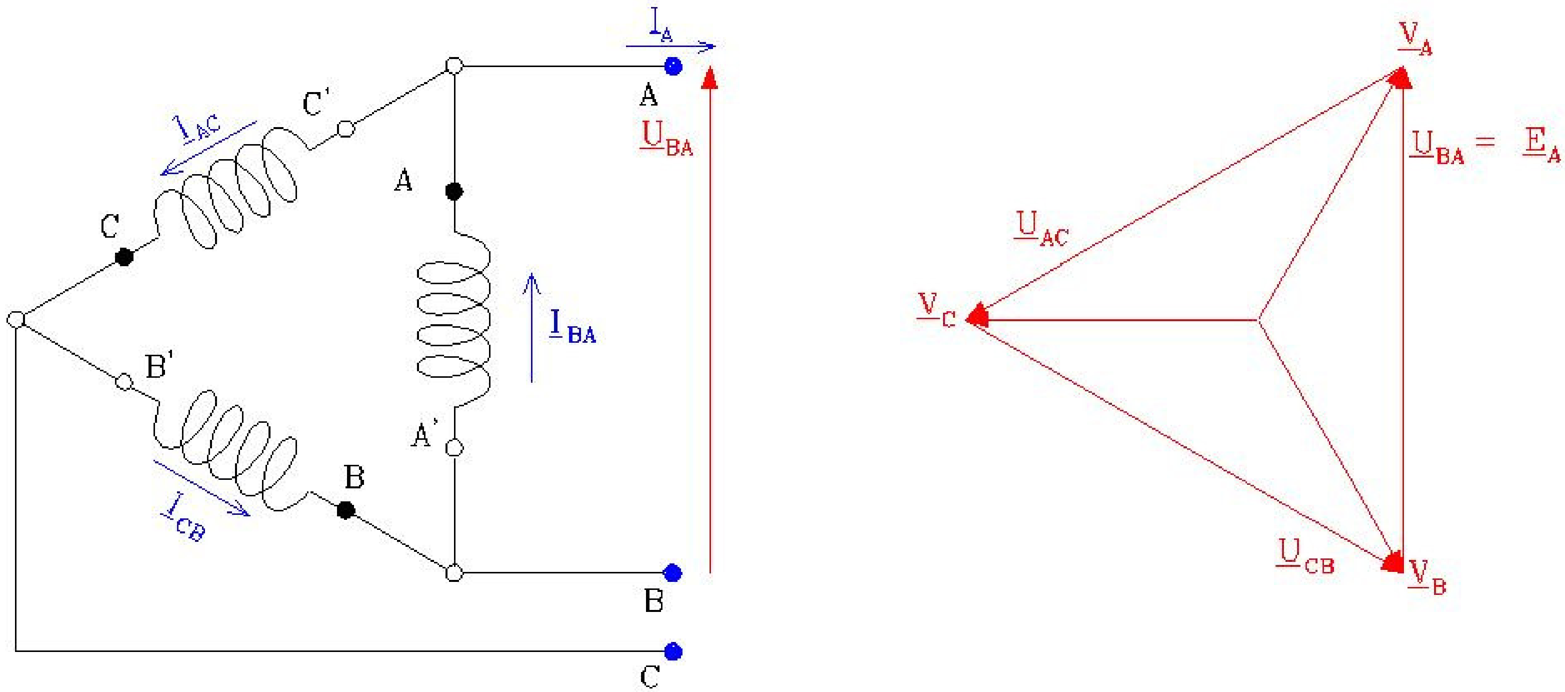
$$\underline{\alpha}^2 + 1 = -\underline{\alpha} = \angle\frac{5\pi}{3} \quad ; \quad \underline{\alpha}^2 - 1 = \sqrt{3}\,\angle\frac{7\pi}{6}$$

Triphasé étoile

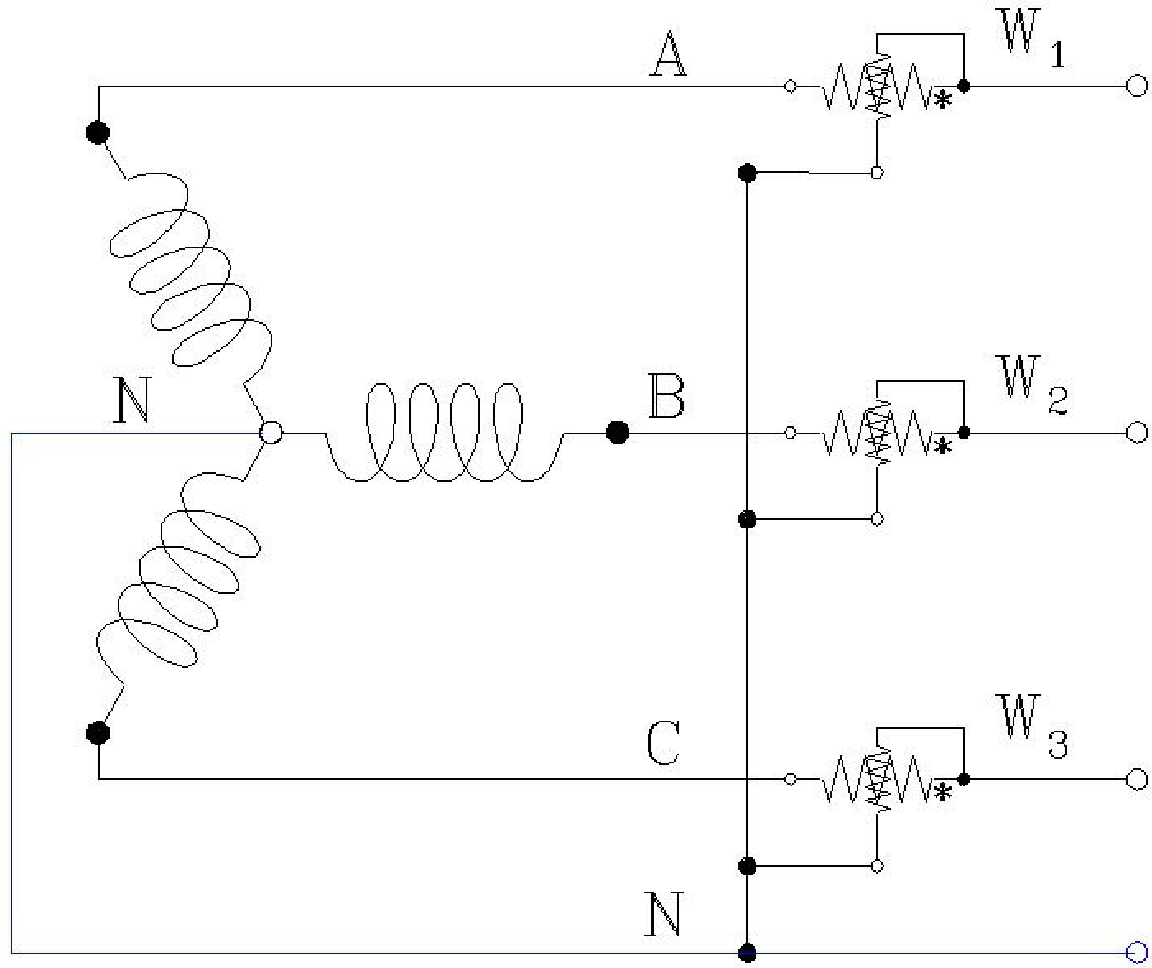




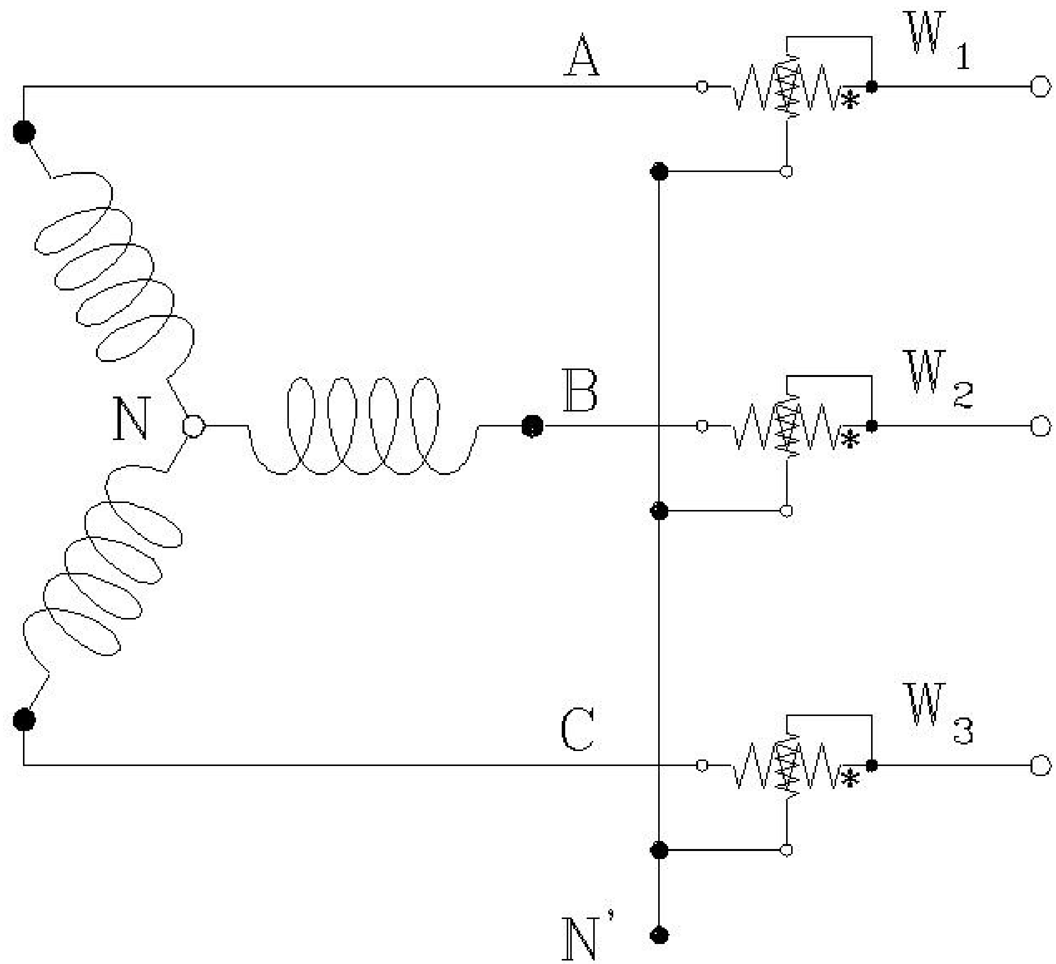
Triphasé triangle



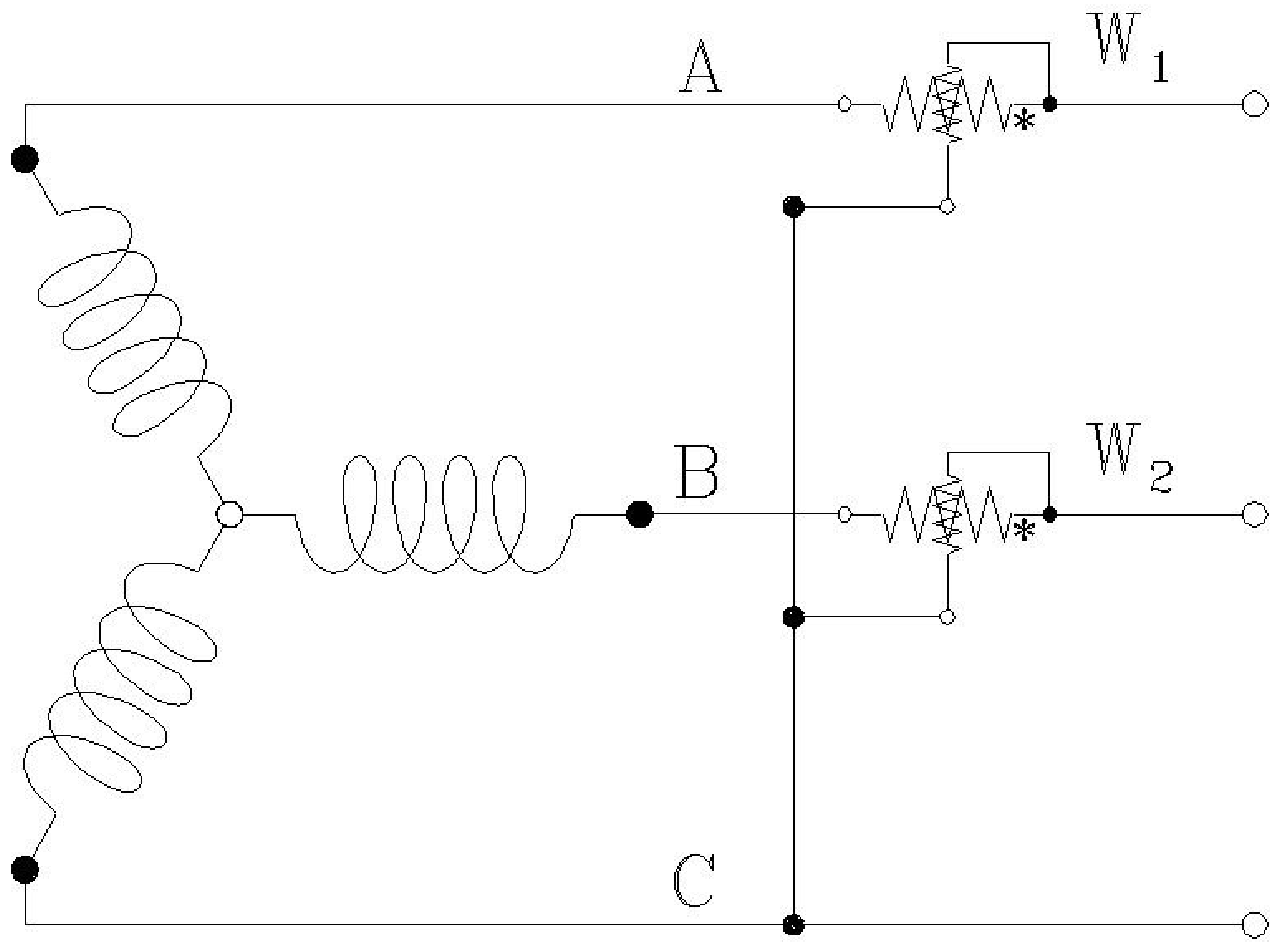
Circuit triphasé étoile AVEC fil neutre



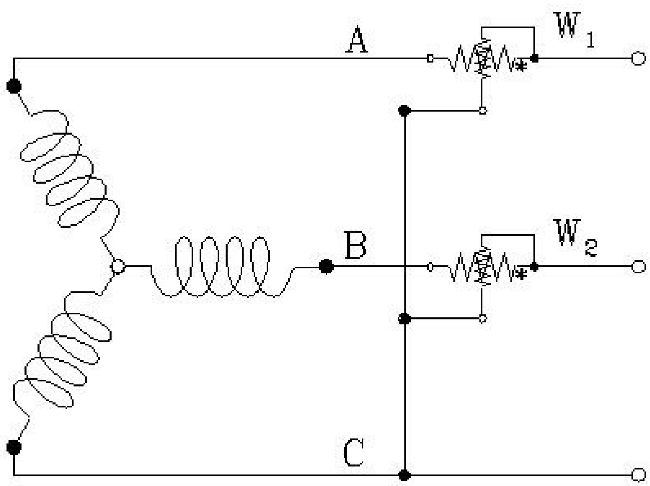
Circuit triphasé étoile SANS fil neutre

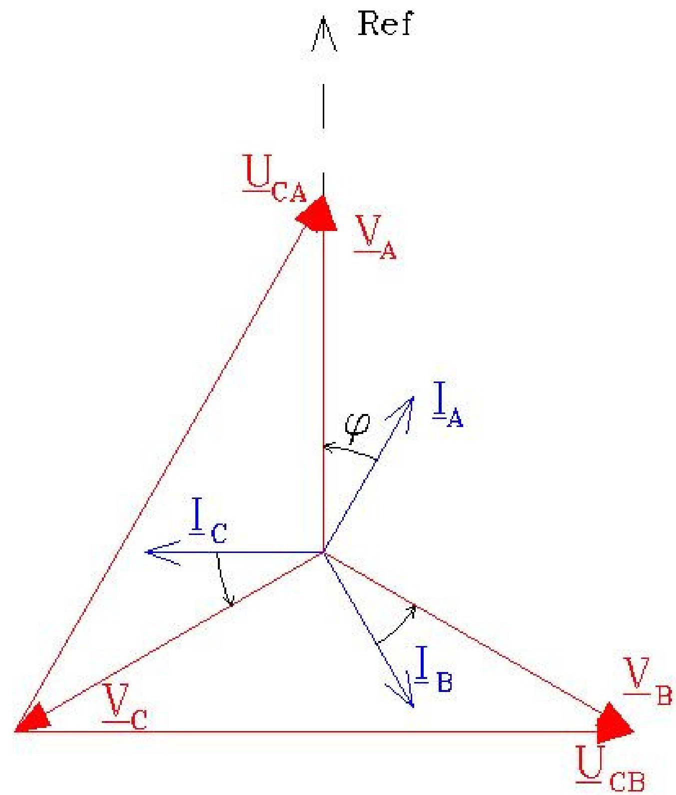


Méthode des deux wattmètres

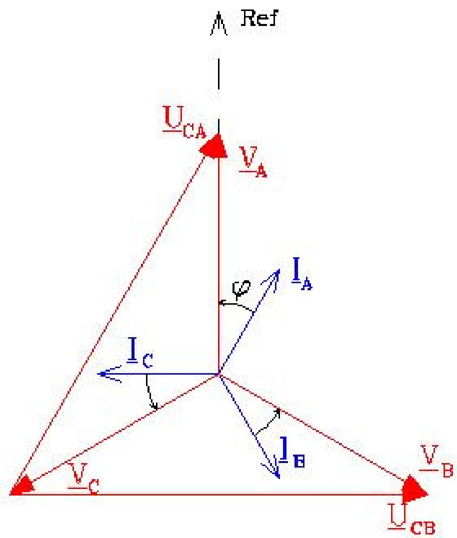


Méthode des deux wattmètres





Méthode des deux wattmètres



$$\underline{V_A} = V \angle 0$$

$$\underline{V_B} = V \angle -\frac{2\pi}{3}$$

$$\underline{V_C} = V \angle \frac{2\pi}{3}$$

$$\underline{I_A} = I \angle -\varphi$$

$$\underline{I_B} = I \angle -\varphi - \frac{2\pi}{3}$$

$$\underline{I_C} = I \angle -\varphi + \frac{2\pi}{3}$$

$$\underline{U_{CA}} = \underline{V_A} - \underline{V_C} = V\sqrt{3} \angle -\frac{\pi}{6}$$

$$\underline{U_{CB}} = \underline{V_B} - \underline{V_C} = V\sqrt{3} \angle -\frac{\pi}{2}$$

$$W_1 = \mathbf{Re}\,(\underline{U_{CA}}\ \underline{I_A^*}) = U\ I\ \cos(-\frac{\pi}{6} + \varphi)$$

$$W_2 = \mathbf{Re}\,(\underline{U_{CB}}\ \underline{I_B^*}) = U\ I\ \cos(-\frac{\pi}{2} + \varphi + \frac{2\pi}{3})$$

$$= U\ I\ \cos(\frac{\pi}{6} + \varphi)$$

Facteur de puissance

Si nous posons $\boldsymbol{a} = W_2 / W_1$, il vient :

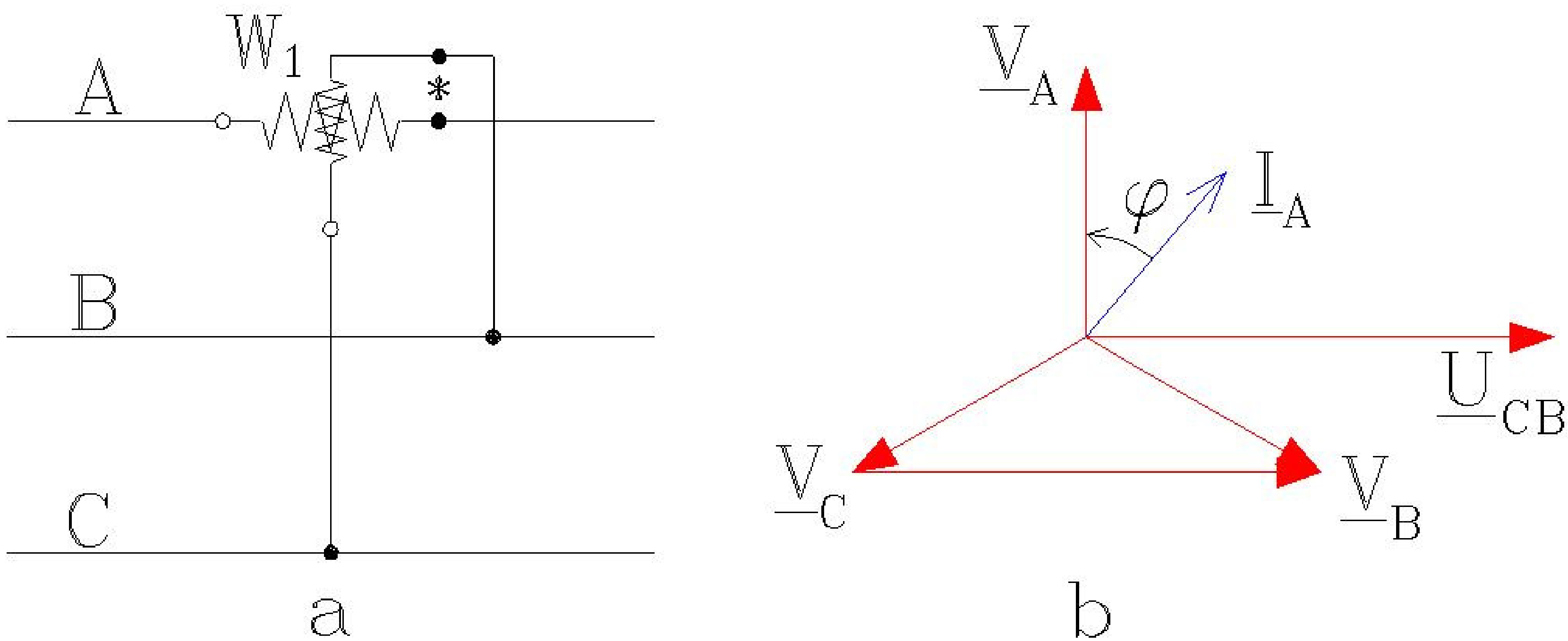
$$a = \frac{\cos\left(\frac{\pi}{6} + \varphi\right)}{\cos\left(\frac{\pi}{6} - \varphi\right)} = \frac{\cos\frac{\pi}{6}\cos\varphi - \sin\frac{\pi}{6}\sin\varphi}{\cos\frac{\pi}{6}\cos\varphi + \sin\frac{\pi}{6}\sin\varphi}$$

$$= \frac{\sqrt{3} - tg\,\varphi}{\sqrt{3} + tg\,\varphi}$$

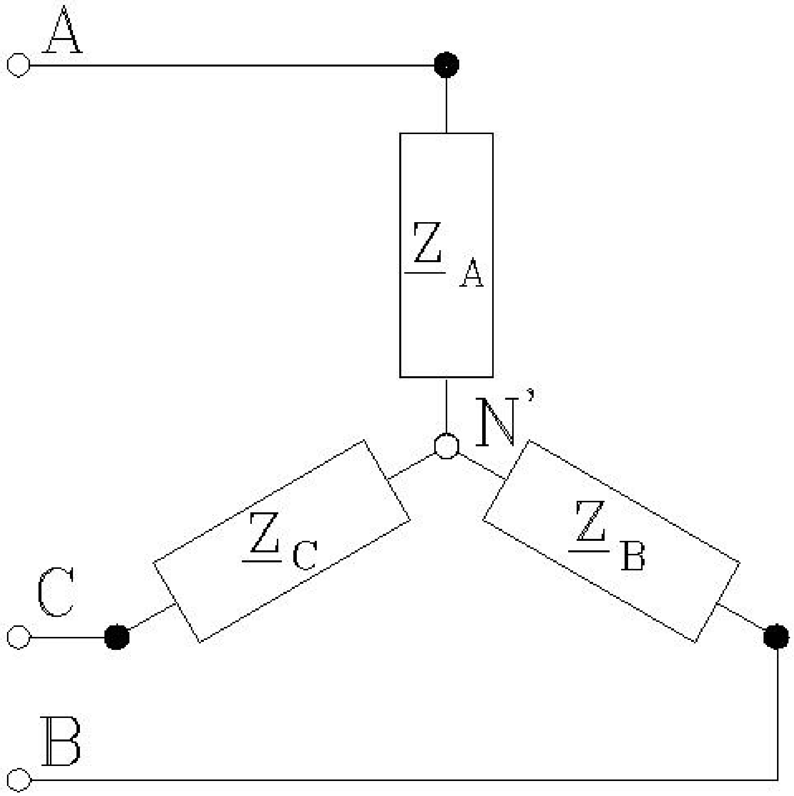
d'où l'on tire:

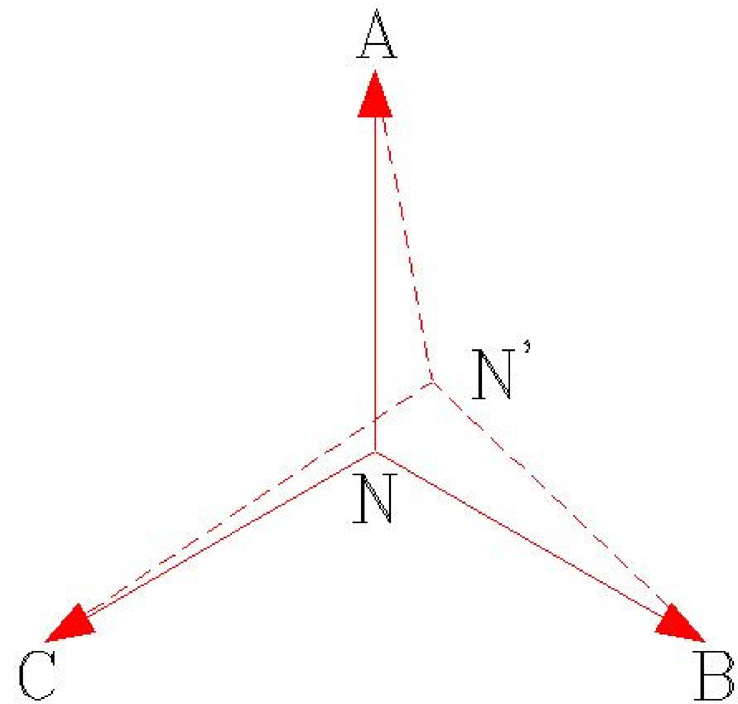
$$tg\,\varphi = \sqrt{3}\,\frac{1 - a}{1 + a} = \sqrt{3}\,\frac{W_1 - W_2}{W_1 + W_2}$$

Puissance réactive dans un circuit équilibré

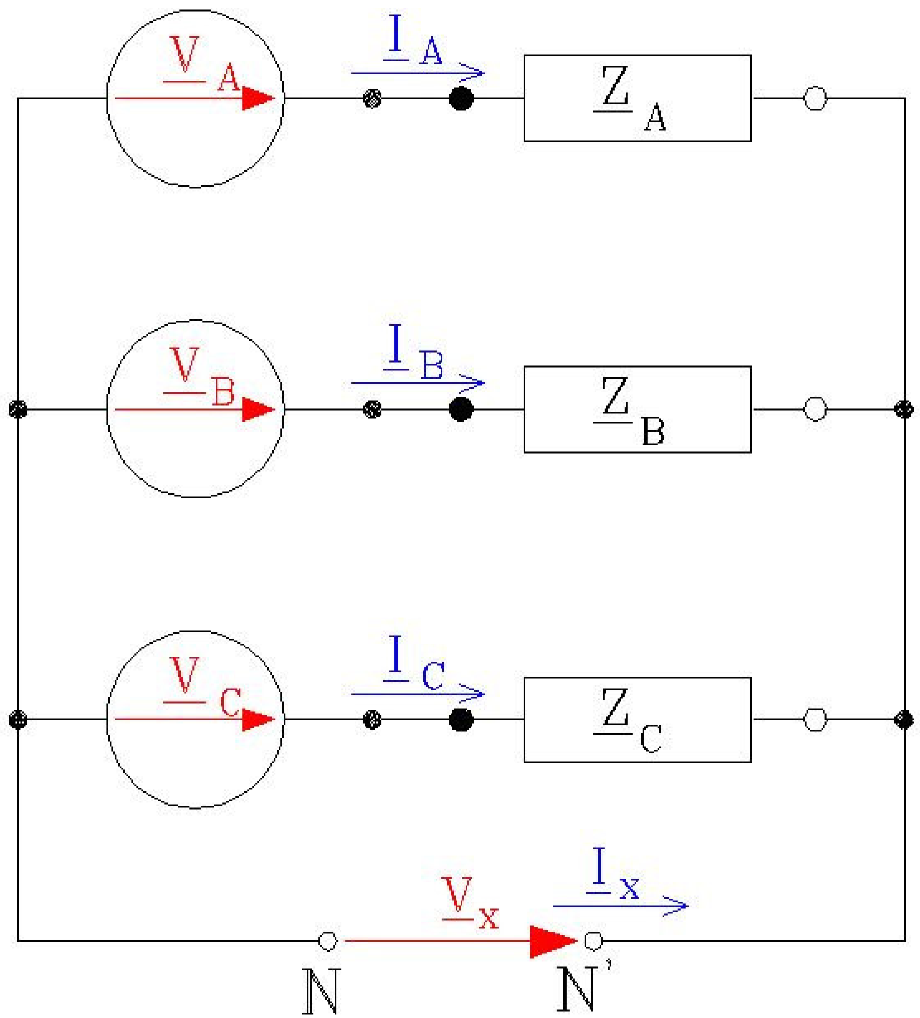


Déplacement du point neutre

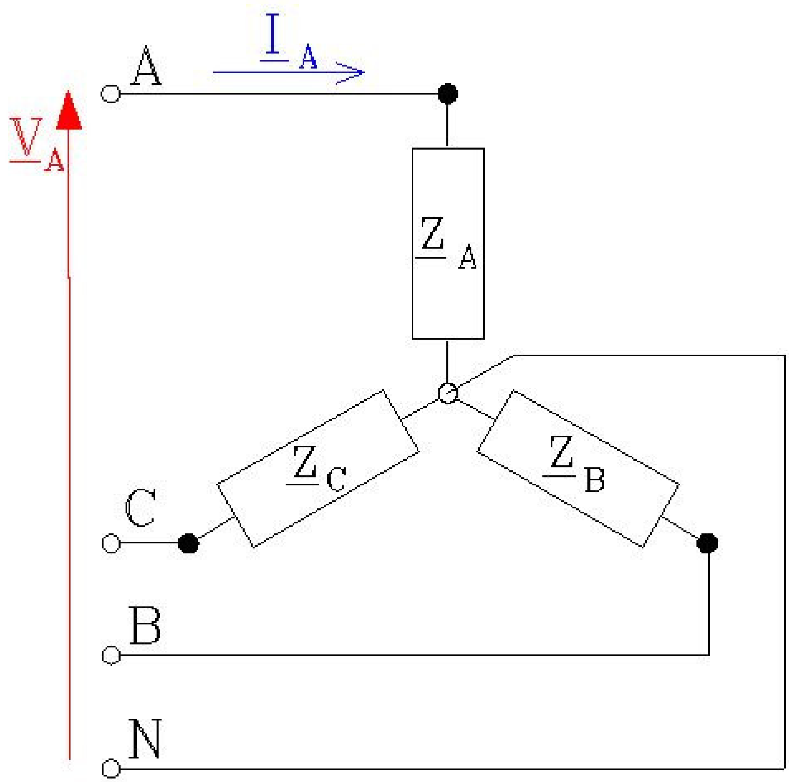




Déplacement du point neutre

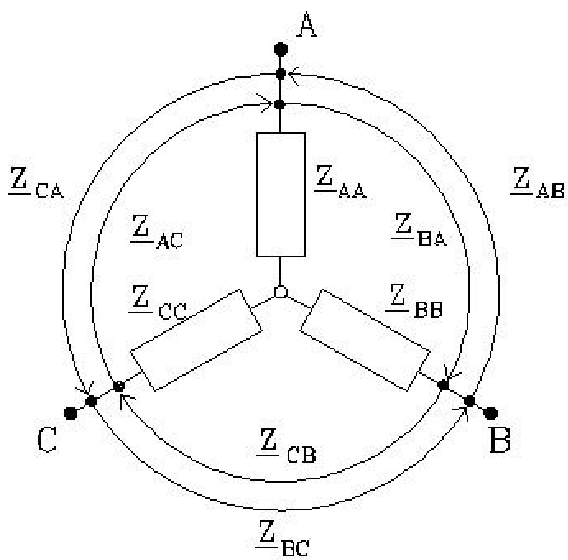


Système triphasé d'impédances SANS mutuelle



$$[\underline{Z}_T] = \begin{bmatrix} \underline{Z}_A & 0 & 0 \\ 0 & \underline{Z}_B & 0 \\ 0 & 0 & \underline{Z}_C \end{bmatrix}$$

Système triphasé d'impédances AVEC mutuelles



$$\left[\underline{\underline{Z}}_T\right] = \begin{bmatrix} \underline{\underline{Z}}_{AA} & \underline{\underline{Z}}_{AB} & \underline{\underline{Z}}_{AC} \\ \underline{\underline{Z}}_{BA} & \underline{\underline{Z}}_{BB} & \underline{\underline{Z}}_{BC} \\ \underline{\underline{Z}}_{CA} & \underline{\underline{Z}}_{CB} & \underline{\underline{Z}}_{CC} \end{bmatrix}$$

Les transformations linéaires

On définit un nouveau système triphasé de tension et de courant :

$$\left[\underline{V_M}\right] = \begin{bmatrix} \underline{V_x} \\ \underline{V_y} \\ \underline{V_z} \end{bmatrix} \quad , \quad \left[\underline{I_M}\right] = \begin{bmatrix} \underline{I_x} \\ \underline{I_y} \\ \underline{I_z} \end{bmatrix}$$

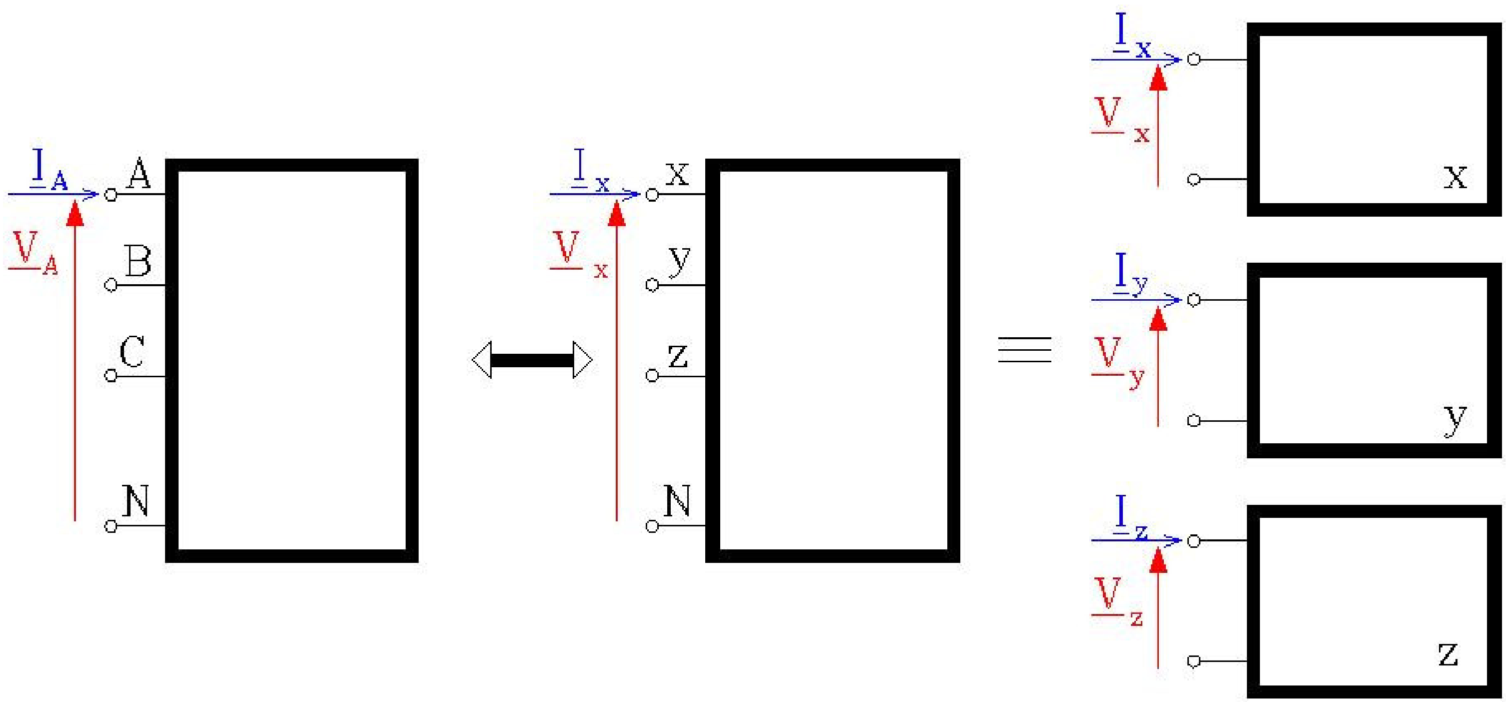
qui est lié au système triphasé par :

$$\left[\underline{V_T}\right] = \left[\underline{M_V}\right]\left[\underline{V_M}\right] \;\; et \;\; \left[\underline{I_T}\right] = \left[\underline{M_I}\right]\left[\underline{I_M}\right]$$

Les 2 matrices ***3 × 3*** $\underline{M_V}$ ***et*** $\underline{M_I}$ à coefficients complexes sont supposées régulières de sorte que l'on peut écrire :

$$\left[\underline{V_M}\right] = \left[\underline{M_V}\right]^{-1}\left[\underline{V_T}\right] \;\; et \;\; \left[\underline{I_M}\right] = \left[\underline{M_I}\right]^{-1}\left[\underline{I_T}\right]$$

Diagonalisation de la matrice d'impédances = séparation en trois réseaux



Les composantes de Fortescue

$$\left[\underline{\underline{A}}_F\right] = \begin{bmatrix} \underline{\underline{A}}_o \\ \underline{\underline{A}}_d \\ \underline{\underline{A}}_i \end{bmatrix} \quad \textit{avec} \quad \begin{array}{lll} \underline{A}_o & : & \textit{composante homopolaire} \\ \underline{A}_d & : & \textit{composante directe} \\ \underline{A}_i & : & \textit{composante inverse} \end{array}$$

La transformation de Fortescue

La transformation est identique pour les courants et les tensions et vaut :

$$[\underline{F}] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \end{bmatrix}$$

de sorte que

$$[\underline{A}_T] = [\underline{F}][\underline{A}_F]$$

De même pour la transformée inverse :

$$[\underline{F}]^{-1} = \frac{1}{3}\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \end{bmatrix}$$

de sorte que

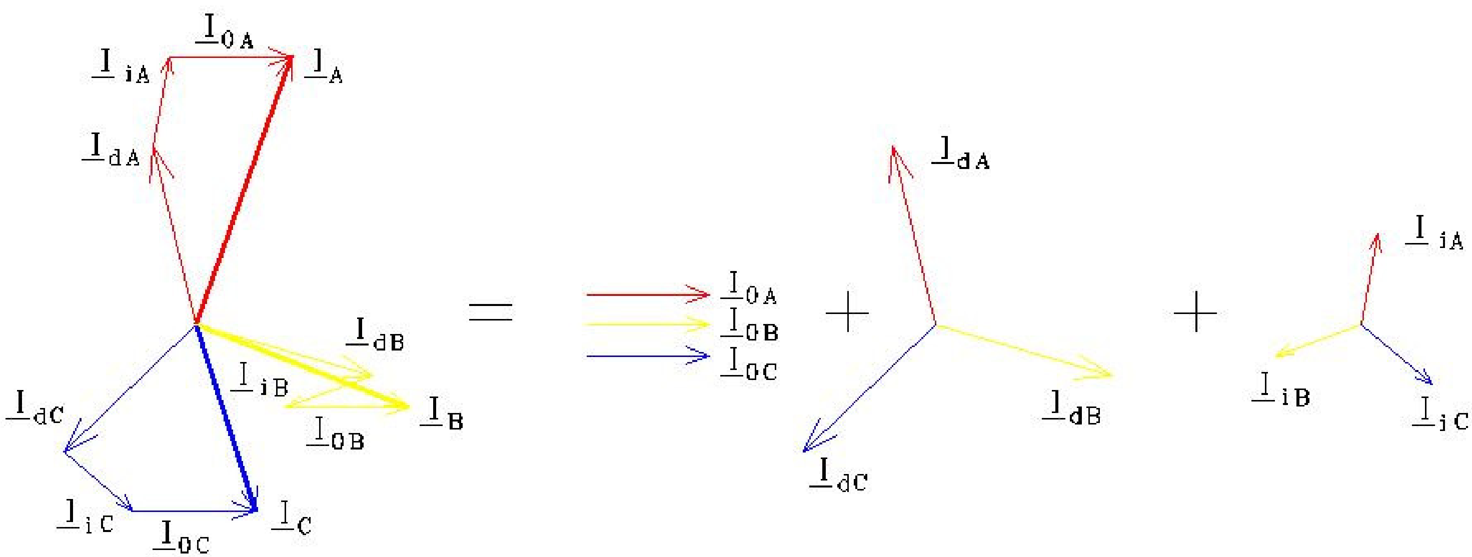
$$[\underline{A}_F] = [\underline{F}]^{-1}[\underline{A}_T]$$

Superposition

$$\underline{I_A} = \underline{I_o} + \underline{I_d} + \underline{I_i}$$

$$\underline{I_B} = \underline{I_o} + \underline{a}^2\,\underline{I_d} + \underline{a}\,\underline{I_i}$$

$$\underline{I_C} = \underline{I_o} + \underline{a}\,\underline{I_d} + \underline{a}^2\,\underline{I_i}$$



Déséquilibré = homopolaire + direct + inverse

Matrice d'impédance

$$[\underline{\underline{Z}}_F] = [\underline{F}]^{-1}[\underline{\underline{Z}}_T][\underline{F}]$$

$$[\underline{\underline{Z}}_F] = \frac{1}{3}\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{\alpha} & \underline{\alpha}^2 \\ 1 & \underline{\alpha}^2 & \underline{\alpha} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \underline{Z}_{AA} & \underline{Z}_{AB} & \underline{Z}_{AC} \\ \underline{Z}_{BA} & \underline{Z}_{BB} & \underline{Z}_{BC} \\ \underline{Z}_{CA} & \underline{Z}_{CB} & \underline{Z}_{CC} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{\alpha}^2 & \underline{\alpha} \\ 1 & \underline{\alpha} & \underline{\alpha}^2 \end{bmatrix}$$

Matrice d'impédance

$$
\left[\,\underline{Z}_F\,\right] = \frac{1}{3}\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \end{bmatrix}
\begin{bmatrix}
\underline{Z}_{AA}+\underline{Z}_{AB}+\underline{Z}_{AC} & \underline{Z}_{AA}+\underline{a}^2\underline{Z}_{AB}+\underline{a}\underline{Z}_{AC} & \underline{Z}_{AA}+\underline{a}\underline{Z}_{AB}+\underline{a}^2\underline{Z}_{AC} \\
\underline{Z}_{BA}+\underline{Z}_{BB}+\underline{Z}_{BC} & \underline{Z}_{BA}+\underline{a}^2\underline{Z}_{BB}+\underline{a}\underline{Z}_{BC} & \underline{Z}_{BA}+\underline{a}\underline{Z}_{BB}+\underline{a}^2\underline{Z}_{BC} \\
\underline{Z}_{CA}+\underline{Z}_{CB}+\underline{Z}_{CC} & \underline{Z}_{CA}+\underline{a}^2\underline{Z}_{CB}+\underline{a}\underline{Z}_{CC} & \underline{Z}_{CA}+\underline{a}\underline{Z}_{CB}+\underline{a}^2\underline{Z}_{CC}
\end{bmatrix}
$$

$$
= \frac{1}{3}\begin{bmatrix}
\begin{matrix} \underline{Z}_{AA}+\underline{Z}_{BB}+\underline{Z}_{CC} \\ +\ \underline{Z}_{AB}+\underline{Z}_{BC}+\underline{Z}_{CA} \\ +\ \underline{Z}_{BA}+\underline{Z}_{AC}+\underline{Z}_{CB} \end{matrix} &
\begin{matrix} \underline{Z}_{AA}+\underline{a}^2\underline{Z}_{BB}+\underline{a}\underline{Z}_{CC} \\ +\ \underline{a}^2\ (\underline{Z}_{AB}+\underline{a}^2\underline{Z}_{BC}+\underline{a}\underline{Z}_{CA}) \\ +\ (\underline{Z}_{BA}+\underline{a}\underline{Z}_{AC}+\underline{a}^2\underline{Z}_{CB}) \end{matrix} &
\begin{matrix} \underline{Z}_{AA}+\underline{a}\underline{Z}_{BB}+\underline{a}^2\underline{Z}_{CC} \\ +\ \underline{a}\ (\underline{Z}_{AB}+\underline{a}\underline{Z}_{BC}+\underline{a}^2\underline{Z}_{CA}) \\ +\ (\underline{Z}_{BA}+\underline{a}^2\underline{Z}_{AC}+\underline{a}\underline{Z}_{CB}) \end{matrix} \\[2ex]
\begin{matrix} \underline{Z}_{AA}+\underline{a}\underline{Z}_{BB}+\underline{a}^2\underline{Z}_{CC} \\ +\ (\underline{Z}_{AB}+\underline{a}\underline{Z}_{BC}+\underline{a}^2\underline{Z}_{CA}) \\ +\ \underline{a}\ (\underline{Z}_{BA}+\underline{a}^2\underline{Z}_{AC}+\underline{a}\underline{Z}_{CB}) \end{matrix} &
\begin{matrix} \underline{Z}_{AA}+\underline{Z}_{BB}+\underline{Z}_{CC} \\ +\ \underline{a}^2\ (\underline{Z}_{AB}+\underline{Z}_{BC}+\underline{Z}_{CA}) \\ +\ \underline{a}\ (\underline{Z}_{BA}+\underline{Z}_{AC}+\underline{Z}_{CB}) \end{matrix} &
\begin{matrix} \underline{Z}_{AA}+\underline{a}^2\underline{Z}_{BB}+\underline{a}\underline{Z}_{CC} \\ +\ \underline{a}\ (\underline{Z}_{AB}+\underline{a}^2\underline{Z}_{BC}+\underline{a}\underline{Z}_{CA}) \\ +\ \underline{a}\ (\underline{Z}_{BA}+\underline{a}\underline{Z}_{AC}+\underline{a}^2\underline{Z}_{CB}) \end{matrix} \\[2ex]
\begin{matrix} \underline{Z}_{AA}+\underline{a}^2\underline{Z}_{BB}+\underline{a}\underline{Z}_{CC} \\ +\ (\underline{Z}_{AB}+\underline{a}^2\underline{Z}_{BC}+\underline{a}\underline{Z}_{CA}) \\ +\ \underline{a}^2\ (\underline{Z}_{BA}+\underline{a}\underline{Z}_{AC}+\underline{a}^2\underline{Z}_{CB}) \end{matrix} &
\begin{matrix} \underline{Z}_{AA}+\underline{a}\underline{Z}_{BB}+\underline{a}^2\underline{Z}_{CC} \\ +\ \underline{a}^2\ (\underline{Z}_{AB}+\underline{a}\underline{Z}_{BC}+\underline{a}^2\underline{Z}_{CA}) \\ +\ \underline{a}^2\ (\underline{Z}_{BA}+\underline{a}^2\underline{Z}_{AC}+\underline{a}\underline{Z}_{CB}) \end{matrix} &
\begin{matrix} \underline{Z}_{AA}+\underline{Z}_{BB}+\underline{Z}_{CC} \\ +\ \underline{a}\ (\underline{Z}_{AB}+\underline{Z}_{BC}+\underline{Z}_{CA}) \\ +\ \underline{a}^2\ (\underline{Z}_{BA}+\underline{Z}_{AC}+\underline{Z}_{CB}) \end{matrix}
\end{bmatrix}
$$

Matrice d'impédance

Conditions de diagonalisation

- l'égalité des trois impédances propres;
- l'égalité des impédances mutuelles pour un sens de succession;
- l'égalité des mutuelles pour l'autre sens de succession.

la matrice est diagonale et s'écrit simplement :

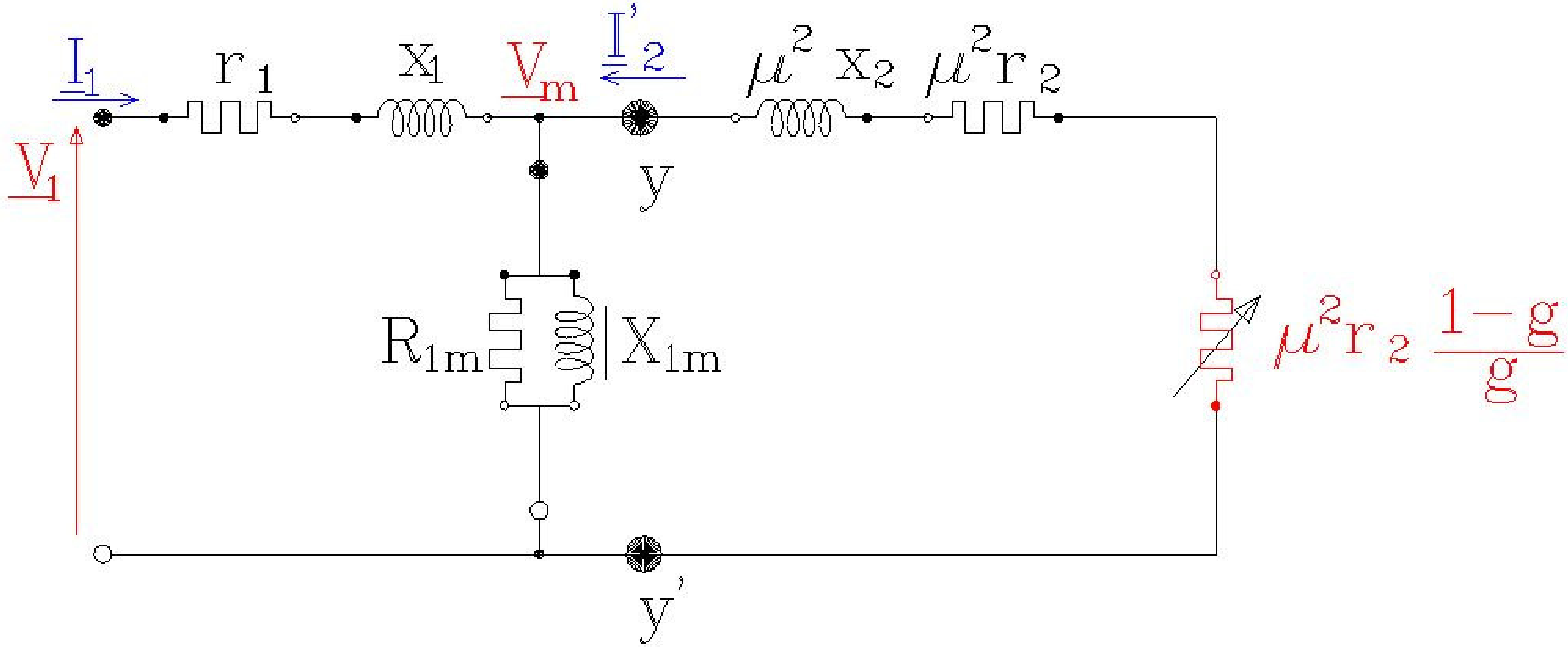
$$[\underline{Z}_F] = \begin{bmatrix} \underline{Z}_o & 0 & 0 \\ 0 & \underline{Z}_d & 0 \\ 0 & 0 & \underline{Z}_i \end{bmatrix}$$

$$\underline{Z}_o \triangleq \textit{impédance homopolaire} = \underline{Z}_{AA} + \underline{Z}_{AB} + \underline{Z}_{BA}$$

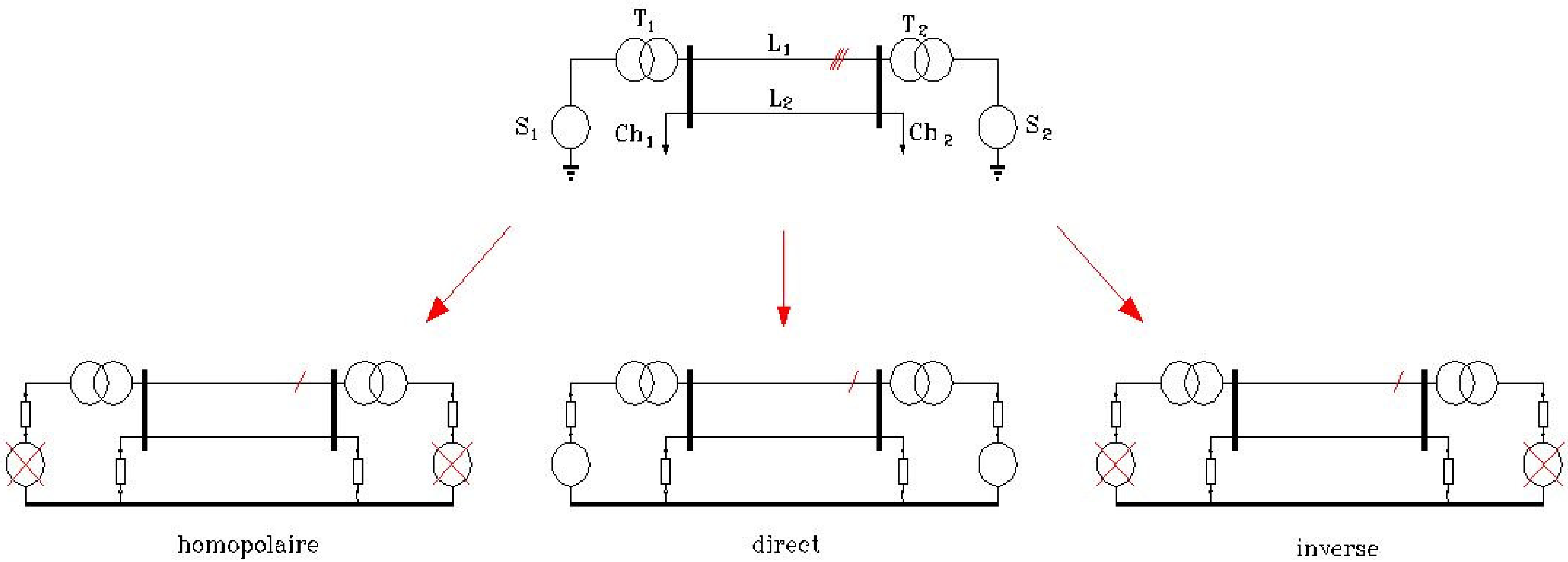
$$\underline{Z}_d \triangleq \textit{impédance directe} = \underline{Z}_{AA} + \underline{\alpha}^2\,\underline{Z}_{AB} + \underline{\alpha}\,\underline{Z}_{BA}$$

$$\underline{Z}_i \triangleq \textit{impédance inverse} = \underline{Z}_{AA} + \underline{\alpha}\,\underline{Z}_{AB} + \underline{\alpha}^2\,\underline{Z}_{BA}$$

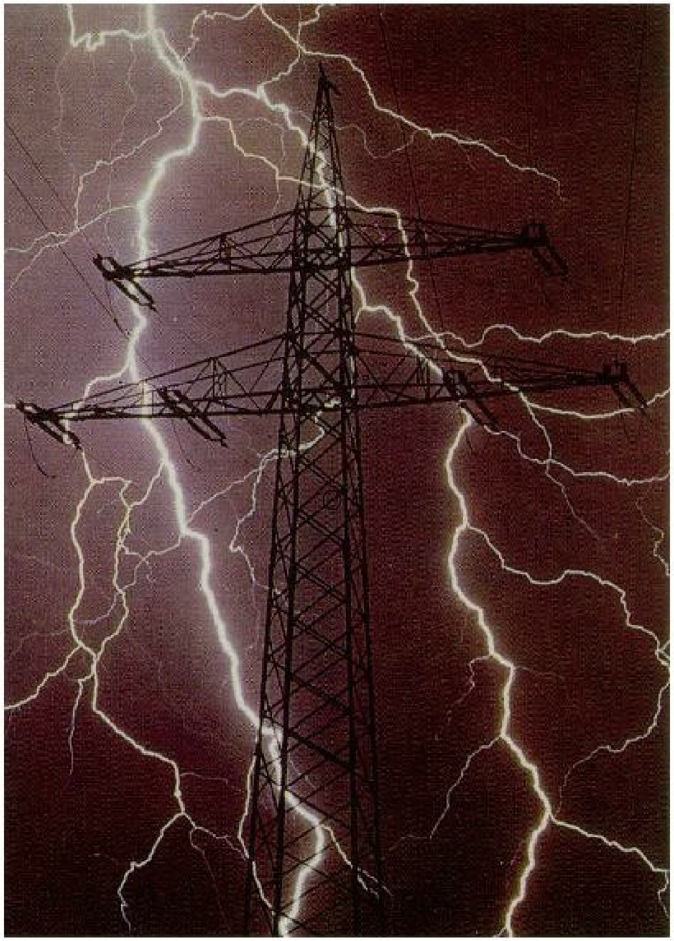
Impédances de Fortescue d'une MAS



Transformation d'un réseau triphasé

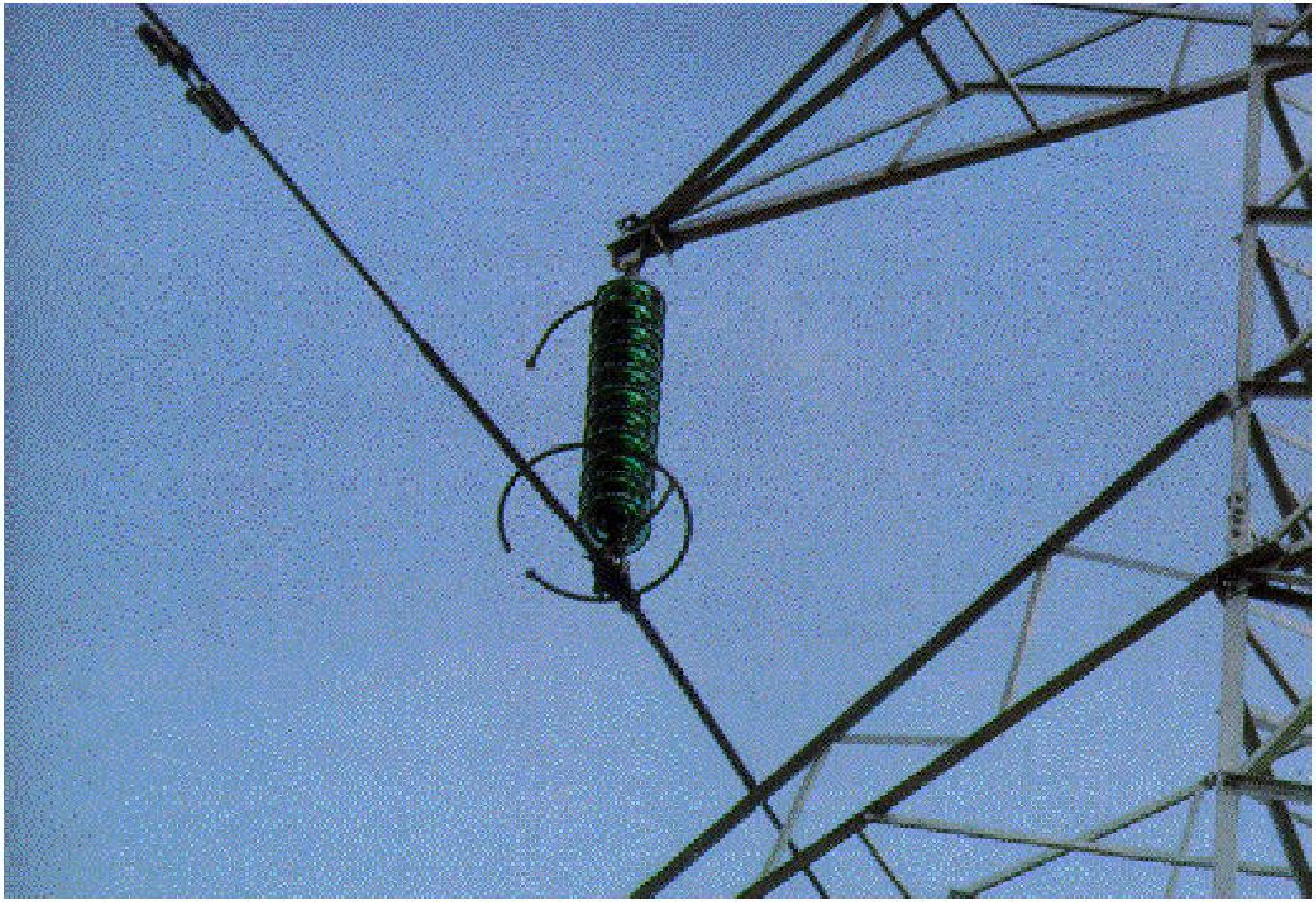


Application : calcul des courants de court-circuit



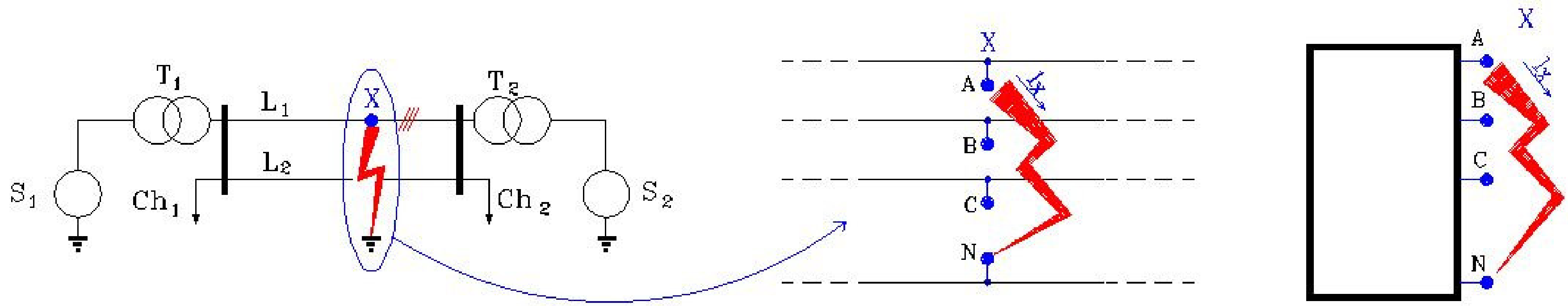
La foudre

Application : calcul des courants de court-circuit

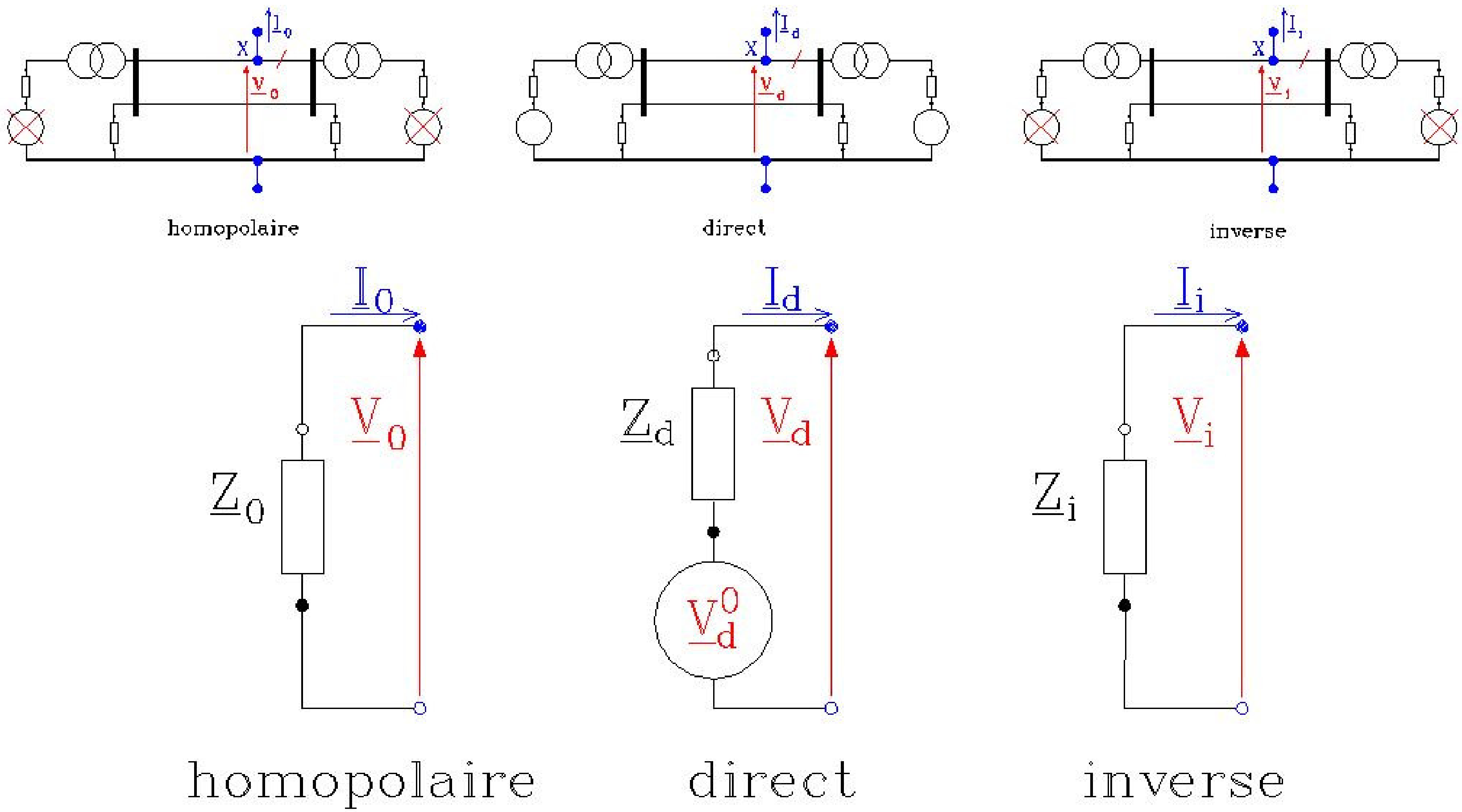


Chaîne d'isolateurs

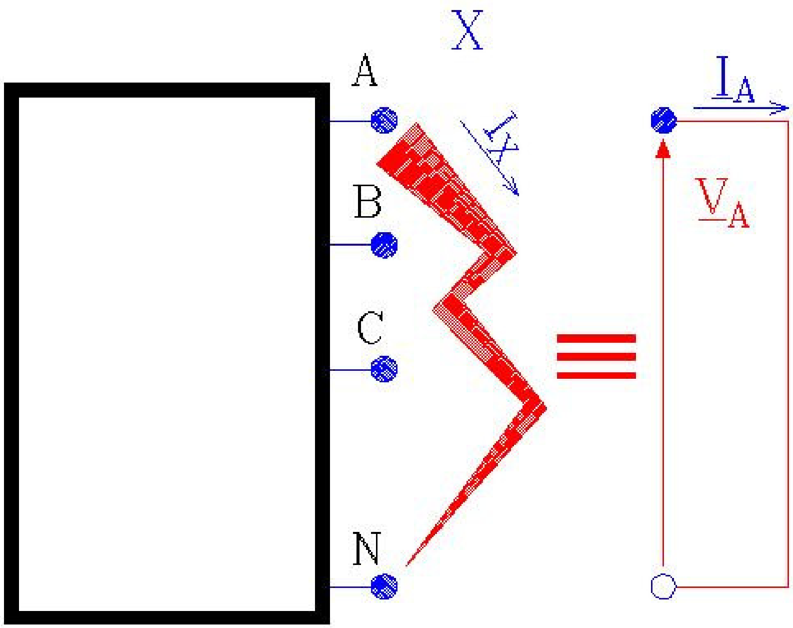
Emplacement du défaut



Les réseaux et leur accès



Défaut monophasé franc sur la phase A

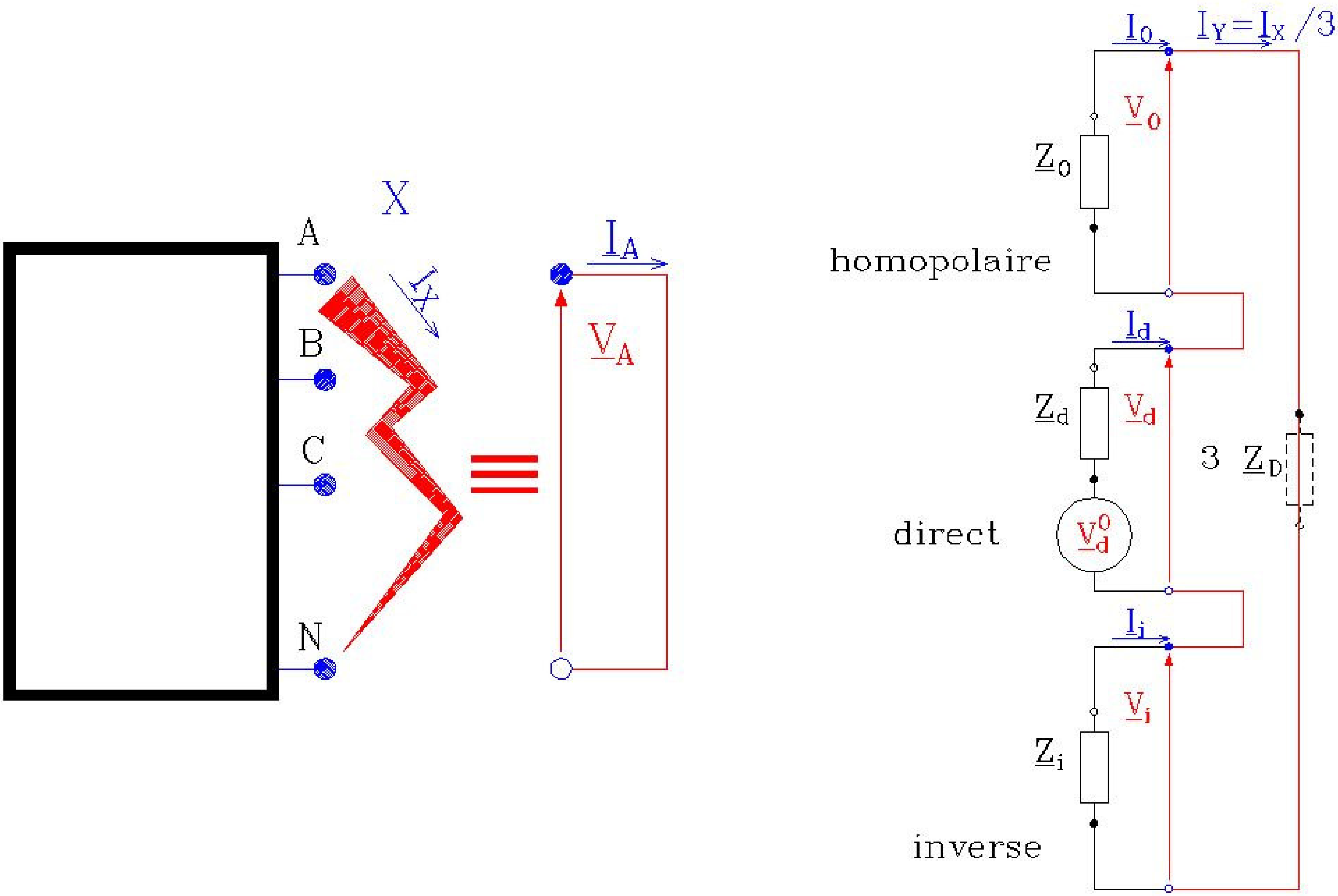


$$\underline{V}_A = 0$$

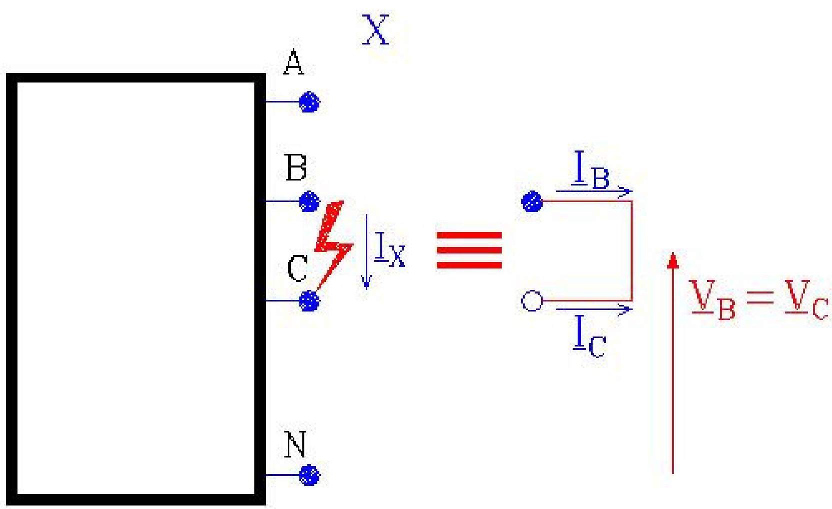
$$\underline{I}_B = \underline{I}_C = 0$$

Posons $\underline{I}_A = \underline{I}_X = \textit{inconnue}$

Défaut monophasé franc sur la phase A



Défaut biphasé franc entre les phases B et C



$$\underline{V}_B = \underline{V}_C$$

$$\underline{I}_A = 0$$

$$\underline{I}_B = -\underline{I}_C = \underline{I}_X = \textit{inconnue}$$

Défaut biphasé franc entre les phases B et C