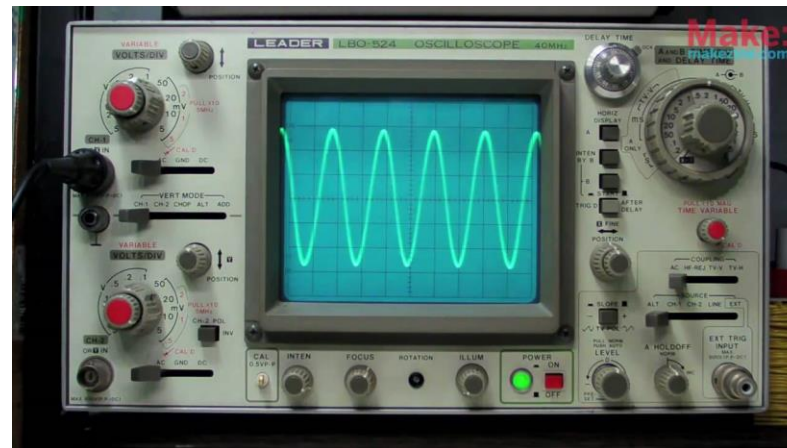


Systemes monophasés et triphasés





Introduction

Nicolas DAMAY
Maître de conférences
Département IM

www.utc.fr
nicolas.damay@utc.fr

Cours SY03 : systèmes monophasé et triphasé



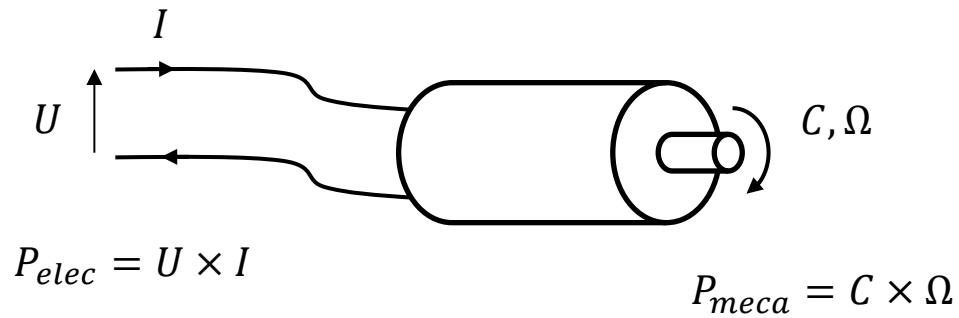
Intérêt de l'alternatif

Réseau
actuel

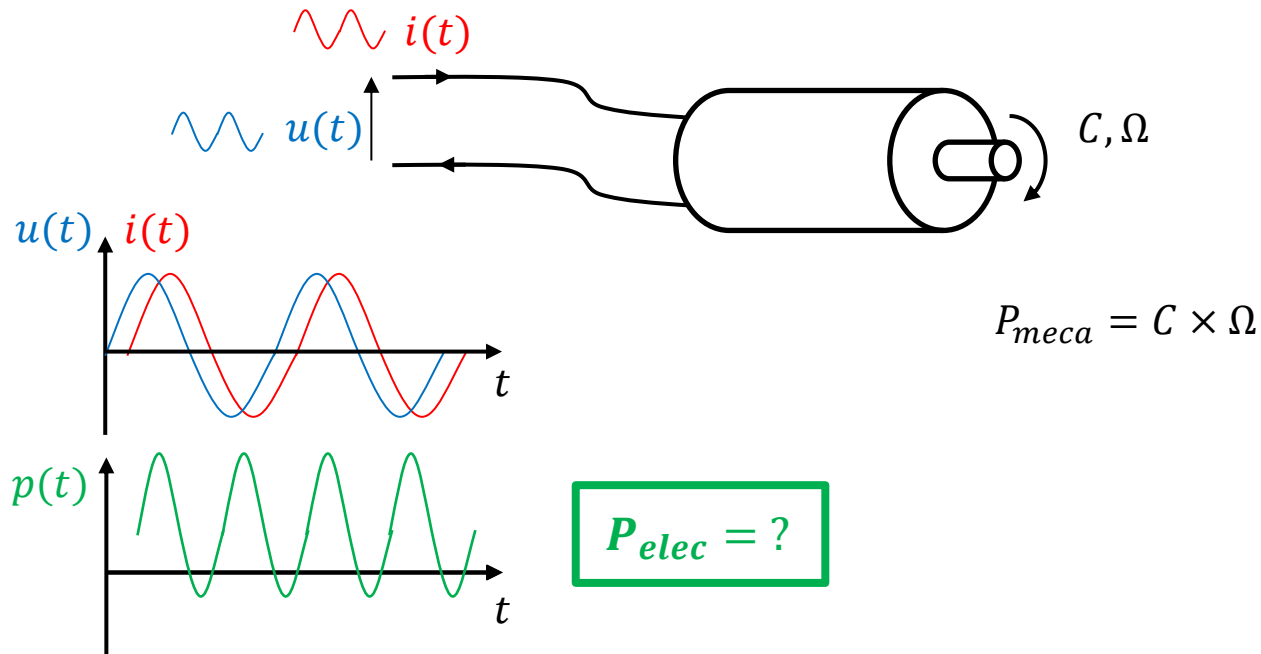
- Année 1880 : apparition des premiers transformateurs avec un bon rendement
- Années 1890 : « guerre des courants » avec Thomas Edison (DC) et Nikola Tesla (AC)
- « Victoire » du courant alternatif sur le courant continu pour les réseaux électriques
 - Création de l'électricité à tension réduite
 - Augmentation de la tension à l'aide de transformateurs
 - Transport de l'électricité à haute tension (moins de pertes)
 - Réduction de la tension à l'aide de transformateurs
 - Acheminement de la basse tension chez les utilisateurs
- Aujourd'hui, les transformateurs peuvent atteindre des rendements $> 99,5\%$
- De plus, l'utilisation de tensions/courants alternatifs a permis l'invention de nombreux principes de fonctionnement de machines électriques (synchrone et asynchrone notamment...)



Puissance en continu

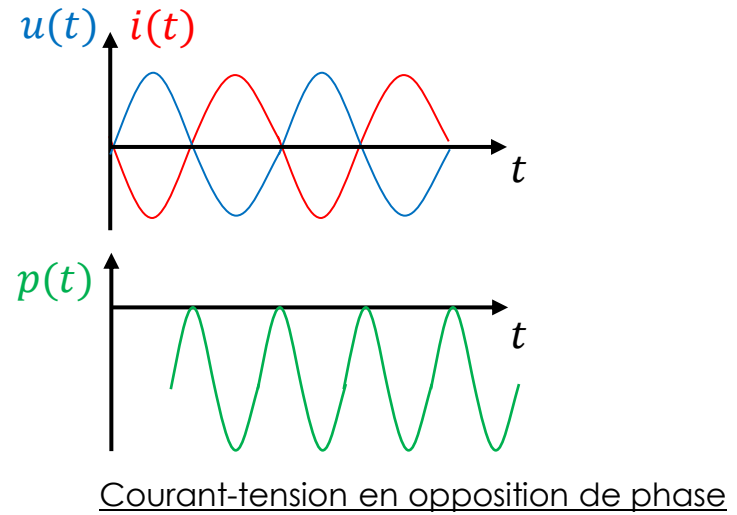
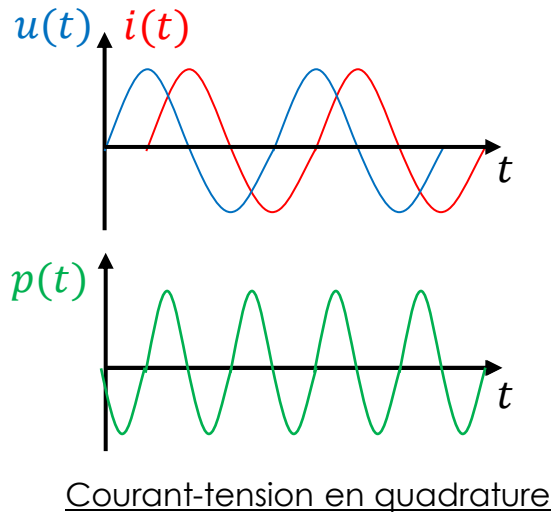
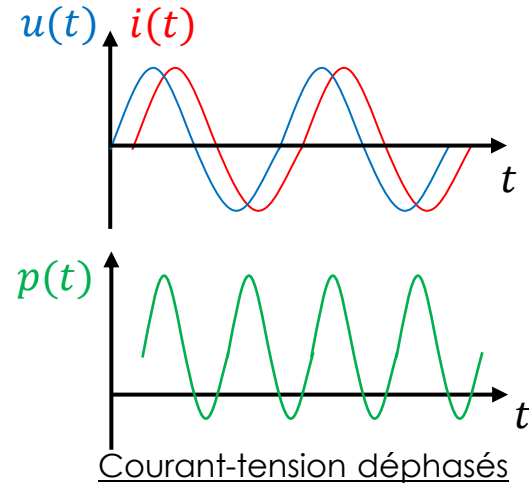
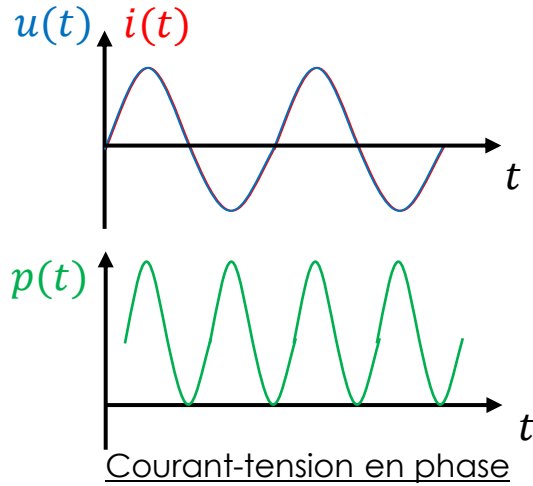


Puissance en alternatif monophasé ?



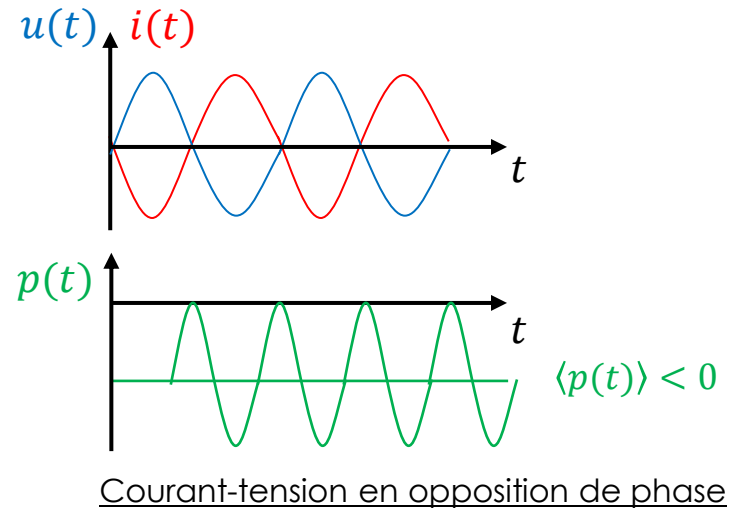
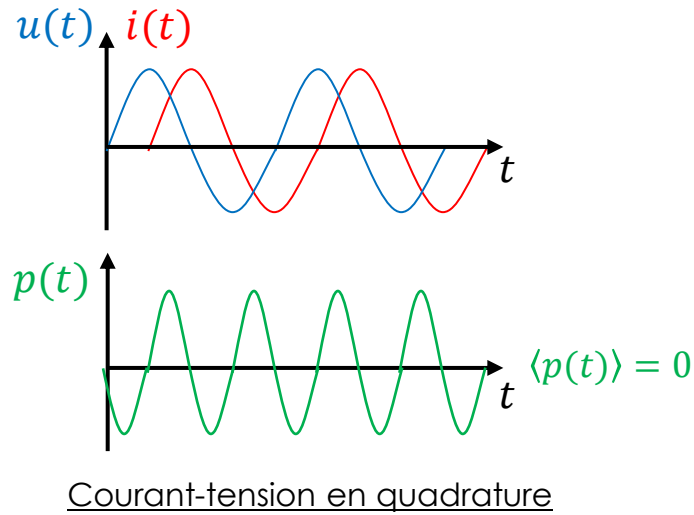
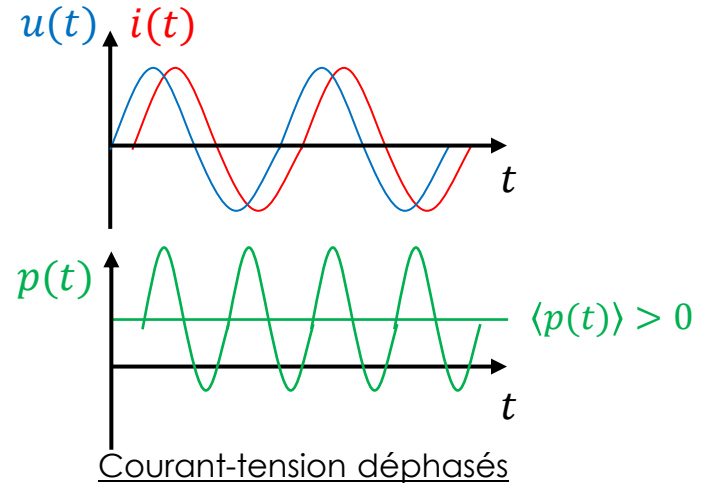
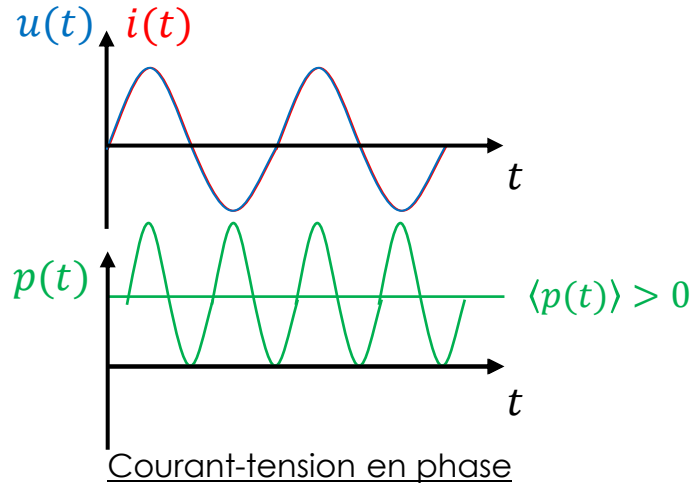


Quelques situations possibles





Conclusion : puissance moyenne dépendante du déphasage





Notions de base (alternatif monophasé)

Nicolas DAMAY
Maître de conférences
Département IM

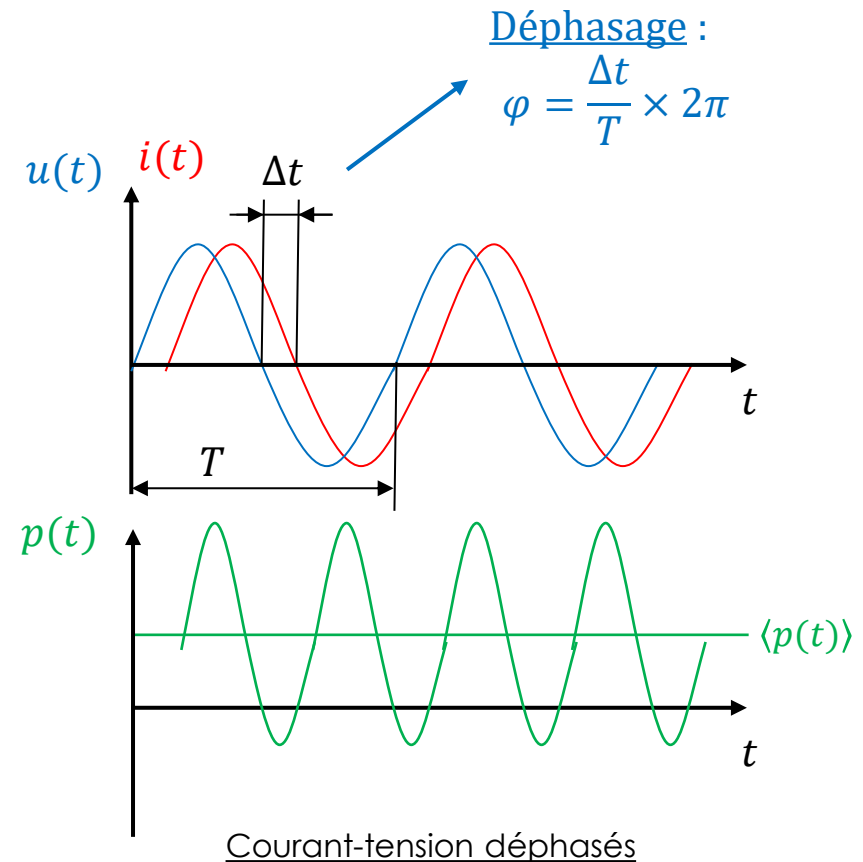
www.utc.fr
nicolas.damay@utc.fr

Cours SY03 : systèmes monophasé et triphasé



Notions de base

- Signal périodique de moyenne nulle
- $u(t) = U_{cr} \times \sin(\omega t - \theta_U)$
- $i(t) = I_{cr} \times \sin(\omega t - \theta_I)$
- Amplitudes U_{cr} (V) et I_{cr} (A)
- Pulsation ω (rad/s)
- Fréquence F (Hz) ($\omega = 2\pi F$)
- Période T (s) ($T = 1/F$)
- Phase θ_U et θ_I (rad)
- Déphasage φ ($\varphi = \theta_U - \theta_I = \frac{\Delta t}{T} \times 2\pi$)

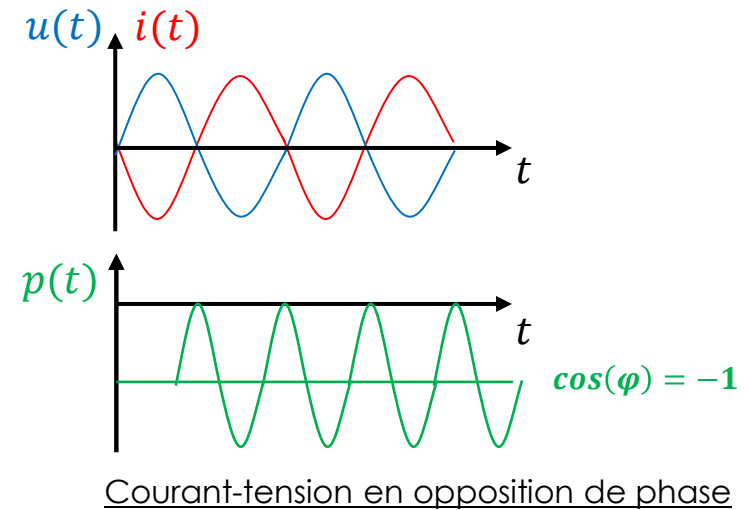
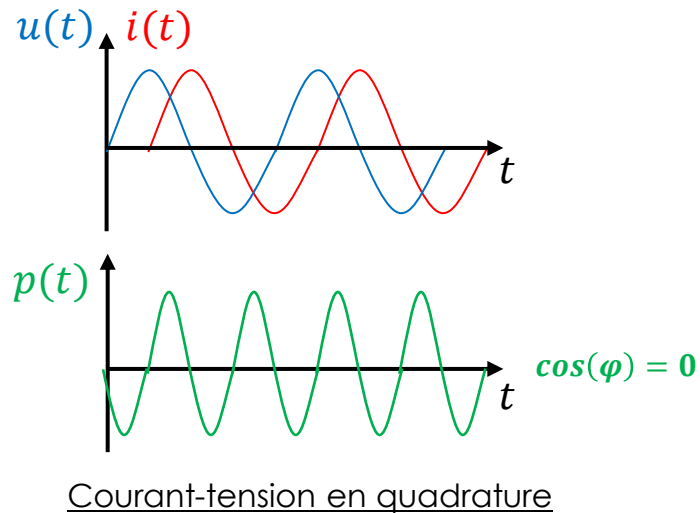
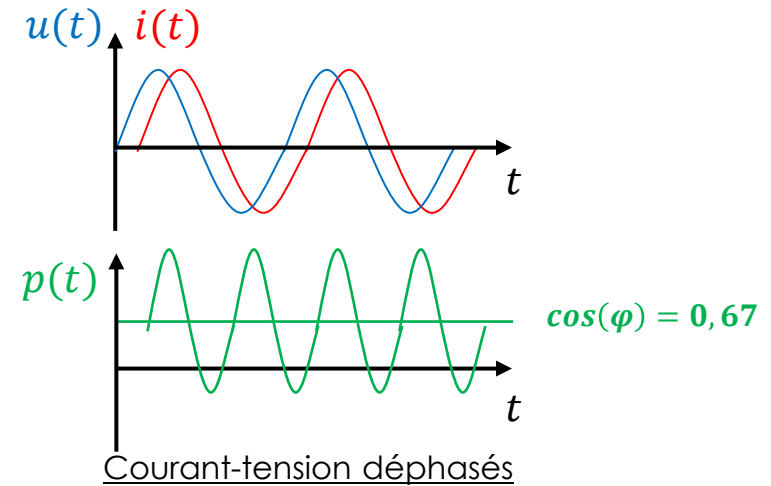
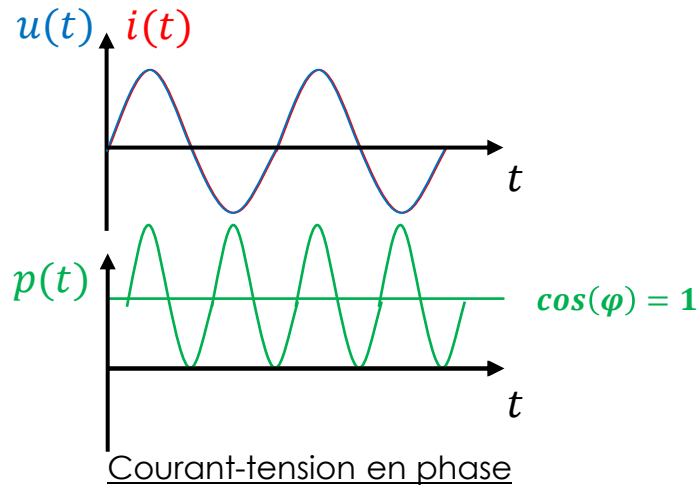


Puissance active P (= moyenne)

- $\langle p(t) \rangle = P = \frac{U_{cr} \times I_{cr}}{2} \times \cos(\varphi)$ avec $\varphi = \frac{\Delta t}{T} \times 2\pi$
- Le terme $\cos(\varphi)$ est appelé facteur de puissance et dépend du déphasage φ



Puissance moyenne dépendante du « facteur de puissance »



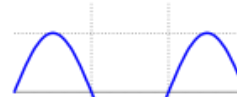


Notion de valeur efficace

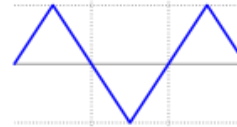
- Signal périodique de moyenne nulle => inutilisable
- On utilise donc sa moyenne quadratique, que l'on appelle valeur efficace

$$s_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} s^2(t) \cdot dt}$$

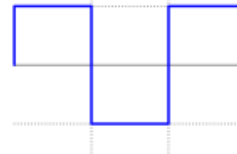
- Cas du sinus : $s_{eff} = \frac{s_{cr}}{\sqrt{2}}$



- Cas du « triangle » : $s_{eff} = \frac{s_{cr}}{\sqrt{3}}$



- Cas du « carré » : $s_{eff} = s_{cr}$



- L'utilisation de la valeur efficace simplifie les calculs de puissance

Dans le cas sinusoïdal : $\langle p(t) \rangle = \frac{U_{cr} \times I_{cr}}{2} \times \cos(\varphi) = U_{eff} I_{eff} \cos(\varphi)$



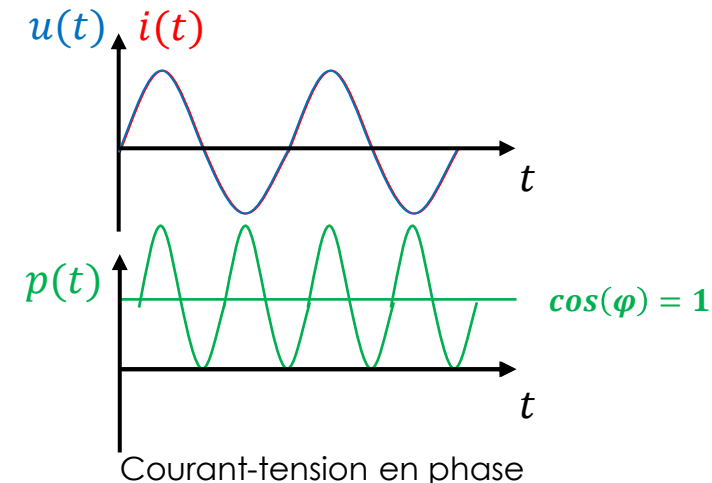
Notion de valeur efficace

- L'utilisation de la valeur efficace permet d'effectuer des calculs de puissance ressemblant aux calculs en courant continu.
- Cas continu : $P = U \times I$
- Cas sinusoïdal : $P = U_{eff} \times I_{eff} \times \cos(\varphi)$
 - La valeur efficace est une sorte « d'équivalent au cas continu »
 - Le facteur de puissance $\cos(\varphi)$ permet de tenir compte du déphasage

Exemple du radiateur (2000 W)

- Tension réseau : 230 V efficace (amplitude : 325 V)
- $U = 230 \sqrt{2} \sin(\omega t)$ (tension réseau)
- $I = 8,7 \sqrt{2} \sin(\omega t)$
- $P = 230 \times 8,7 \times 2 \times \langle \sin^2(\omega t) \rangle$
- Or, $\sin^2(\omega t) = \frac{1 - \cos(2\omega t)}{2}$ (= 0,5 en moyenne)
- $P = 230 \times 8,7 \times 2 \times 0,5 = \underbrace{230 \times 8,7}_{\text{Valeurs efficaces}} = 2000 \text{ W}$

Valeurs efficaces





Effet d'un mauvais facteur de puissance

- $P = U_{eff} \times I_{eff} \times \cos(\varphi)$
- A puissance active constante, un mauvais facteur de puissance entraîne une augmentation du besoin en tension-courant.
 - Bon facteur de puissance = plus de puissance transmise

Exemple : consommation d'un moteur en direct sur le réseau

- Une machine synchrone devant fournir 5 kW (mécanique) sous 230 V efficace (AC)
 - Rendement : 0,9
 - Il faut une puissance électrique de $P_{elec} = 5,56 \text{ kW}$
- Avec un facteur de puissance de 0,84 (valeur typique)
 - $P_{elec} = U I \cos(\varphi) \Leftrightarrow I = \frac{P_{elec}}{U \cos(\varphi)} = \mathbf{28,8 \text{ A}}$ (efficace)
- Avec un facteur de puissance de 0,95 (utilisation de condensateurs)
 - $P_{elec} = U I \cos(\varphi) \Leftrightarrow I = \frac{P_{elec}}{U \cos(\varphi)} = \mathbf{25,4 \text{ A}}$ (efficace)
- Un mauvais facteur de puissance entraîne une augmentation du courant demandé au réseau, sans augmentation de puissance (*mais plus de pertes pour le fournisseur d'électricité*)



Représentation complexe

Nicolas DAMAY
Maître de conférences
Département IM

www.utc.fr
nicolas.damay@utc.fr

Cours SY03 : systèmes monophasé et triphasé



En résumé

- Les grandeurs sinusoïdales sont caractérisées par deux grandeurs essentielles :
 - leurs valeurs efficaces
 - leurs phases
- Pour les calculs de puissance active, les grandeurs essentielles sont :
 - les valeurs efficaces de la tension et du courant
 - le déphasage entre la tension et le courant (différence entre leurs phases)

Transformée complexe

- $U(t) = U_{cr} \cos(\omega t) = U\sqrt{2} \cos(\omega t) \Rightarrow \underline{U} = U. e^{j.0}$
- $I(t) = I_{cr} \cos(\omega t - \varphi) = I\sqrt{2} \cos(\omega t - \varphi) \Rightarrow \underline{I} = I. e^{-j\varphi}$
- Le calcul de puissance devient alors :
- $\underline{P} = \underline{U} \times \underline{I} = U. e^{j.0}. I. e^{-j\varphi} = U. I. e^{-j\varphi}$
- Formule d'Euler : $e^{-j\varphi} = \cos(-\varphi) + j. \sin(-\varphi)$
- Transformée inverse : $\underline{P} = U. I. e^{-j\varphi} \Rightarrow P = U. I. \cos(-\varphi) = U. I. \cos(\varphi)$

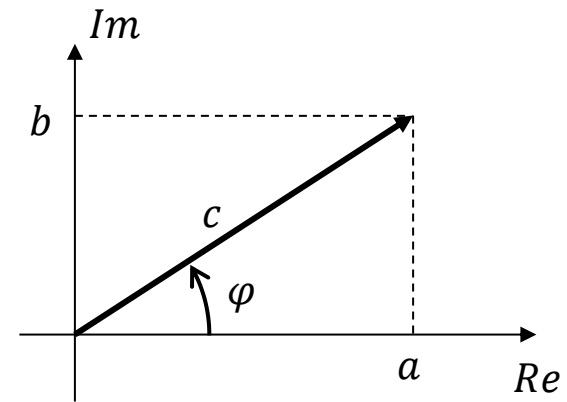
Ici, la tension sert de référence de phase, donc sa phase est considérée nulle

Par convention d'écriture, seuls la valeur efficace et le déphasage sont conservés



Rappel : propriétés des nombres complexes

- Coordonnées cartésiennes ou polaires
- $\underline{I} = a + j.b = c.e^{j\varphi}$
- Cartésiennes => Polaires
 - $c = \sqrt{a^2 + b^2}$
 - $\varphi = \text{atan}\left(\frac{b}{a}\right)$
- Polaires => Cartésiennes
 - $a = c.\cos(\varphi)$
 - $b = c.\sin(\varphi)$
- Propriétés de l'exponentielle complexe
 - Formule d'Euler : $e^{j\varphi} = \cos(\varphi) + j.\sin(\varphi)$
 - $\frac{1}{e^{j\varphi}} = e^{-j\varphi}$





Justification des conventions d'écriture

- Normalement, la transformée complexe consiste à ajouter une partie imaginaire à une grandeur réelle.
 - Ainsi, $U(t) = U_{cr} \cos(\omega t + \theta_U) = U\sqrt{2} \cos(\omega t + \theta_U)$ deviendrait
 - $\underline{U}(t) = U \sqrt{2} (\cos(\omega t + \theta_U) + j \sin(\omega t + \theta_U)) = U \sqrt{2} \cdot e^{j(\omega t + \theta_U)}$
 - De même pour le courant : $I(t) = I_{cr} \cos(\omega t + \theta_I)$
 - $\underline{I}(t) = I \sqrt{2} \cdot e^{j(\omega t + \theta_I)}$
- Souvent, la tension est prise comme « **référence de phase** », ce qui revient à poser $\theta_U = 0 \text{ rad}$.
 - Le déphasage vaut alors $\varphi = \theta_U - \theta_I = -\theta_I$, soit $\theta_I = -\varphi$
 - **On peut alors simplifier l'écriture** : $\underline{U} = U \sqrt{2} \cdot e^{j\omega t}$ et $\underline{I}(t) = I \sqrt{2} \cdot e^{j(\omega t - \varphi)}$
- Généralement, on compare la tension et le courant de la manière suivante :

$$\frac{\underline{U}(t)}{\underline{I}(t)} = \frac{U \sqrt{2} \cdot e^{j(\omega t + \theta_U)}}{I \sqrt{2} \cdot e^{j(\omega t + \theta_I)}} = \frac{U}{I} e^{j(\theta_U - \theta_I)} = \frac{U}{I} e^{j\varphi}$$
 - **On constate que les termes $e^{j\omega t}$ et $\sqrt{2}$ disparaissent** et, en pratique, ils ne sont jamais utiles dans les calculs, c'est pourquoi on simplifie l'écriture en les omettant.

D'où l'écriture conventionnelle suivante : $\underline{U} = U \cdot e^{j \cdot 0}$ et $\underline{I} = I \cdot e^{-j\varphi}$



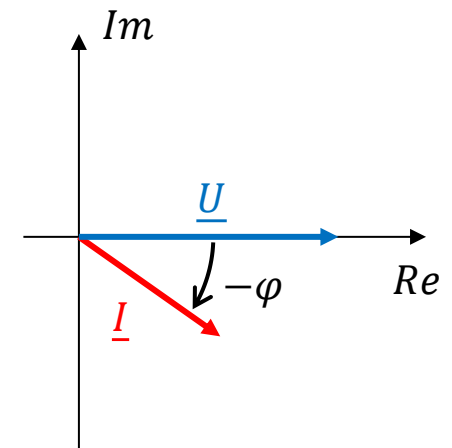
Représentation des nombres complexes

- $U(t) = U_{cr} \sin(\omega t) = U\sqrt{2} \sin(\omega t) \Rightarrow \underline{U} = U \cdot e^{j \cdot 0}$
- $I(t) = I_{cr} \sin(\omega t - \varphi) = I\sqrt{2} \sin(\omega t - \varphi) \Rightarrow \underline{I} = I \cdot e^{-j\varphi}$
- Utilisation des diagrammes de Fresnel
- Représentation générale des grandeurs complexes

$$\underline{U} = U \cdot e^{j \cdot 0}$$

$$\underline{I} = I \cdot e^{-j\varphi}$$

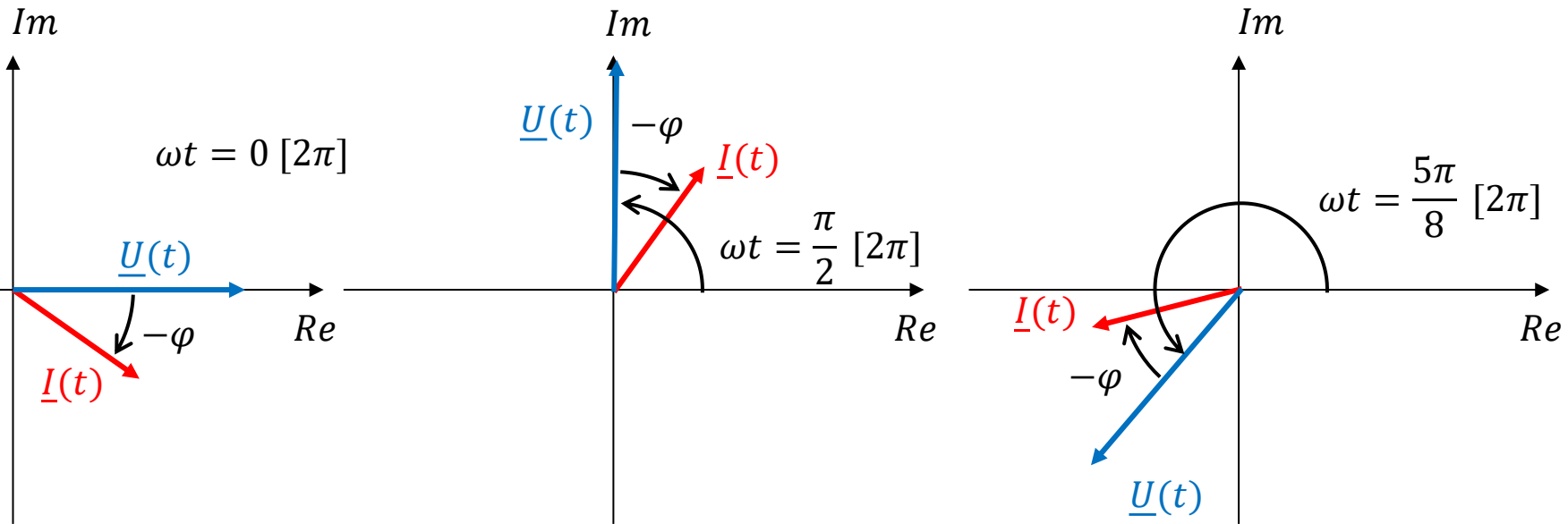
Nombre complexe (pointing to \underline{I})
 Module (pointing to I)
 Argument (angle par rapport à l'axe des réels) (pointing to $-j\varphi$)





Représentation des nombres complexes

- N'oublions pas qu'en réalité, ces grandeurs évoluent dans le temps
 - $U(t) = U_{cr} \sin(\omega t) = U\sqrt{2} \sin(\omega t) \Rightarrow \underline{U} = U \cdot e^{j(\omega t+0)}$
 - $I(t) = I_{cr} \sin(\omega t - \varphi) = I\sqrt{2} \sin(\omega t - \theta_I) \Rightarrow \underline{I} = I \cdot e^{j(\omega t - \varphi)}$



- Les angles des grandeurs varient, mais pas le déphasage φ
- Encore une fois : cette rotation dans le temps est parfois ignorée car inutile pour les calculs de puissance



Application aux dipôles usuels

Résistance

$$\underline{U} = R \cdot \underline{I}$$

$$\underline{U} = (R \cdot e^{j \cdot 0}) \cdot \underline{I}$$

$$\underline{I} = \underline{U} \cdot \left(\frac{1}{R} \cdot e^{j \cdot 0} \right)$$

Inductance

$$\underline{U} = jL\omega \cdot \underline{I}$$

$$\underline{U} = (L\omega \cdot e^{j \cdot \frac{\pi}{2}}) \cdot \underline{I}$$

$$\underline{I} = \underline{U} \cdot \left(\frac{1}{L\omega} \cdot e^{-j \cdot \frac{\pi}{2}} \right)$$

Condensateur

$$\underline{U} = \frac{1}{jC\omega} \cdot \underline{I}$$

$$\underline{U} = \left(\frac{1}{C\omega} \cdot e^{-j \cdot \frac{\pi}{2}} \right) \cdot \underline{I}$$

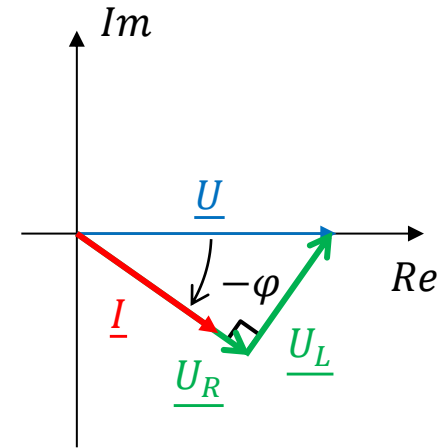
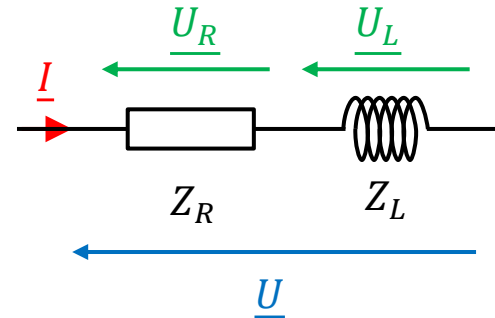
$$\underline{I} = \underline{U} \cdot (C\omega \cdot e^{j \cdot \frac{\pi}{2}})$$

Notion d'impédance complexe



Associations de dipôles

- Résistance en série avec une inductance
- $\underline{U} = \underline{U}_R + \underline{U}_L = R \cdot \underline{I} + jL\omega \cdot \underline{I}$
- $\underline{U} = \underline{Z}_{eq} \cdot \underline{I}$ avec $\underline{Z}_{eq} = R + jL\omega$
- $\underline{Z}_{eq} = Z_{eq} \cdot e^{j\varphi}$
- Relations entre ces grandeurs :



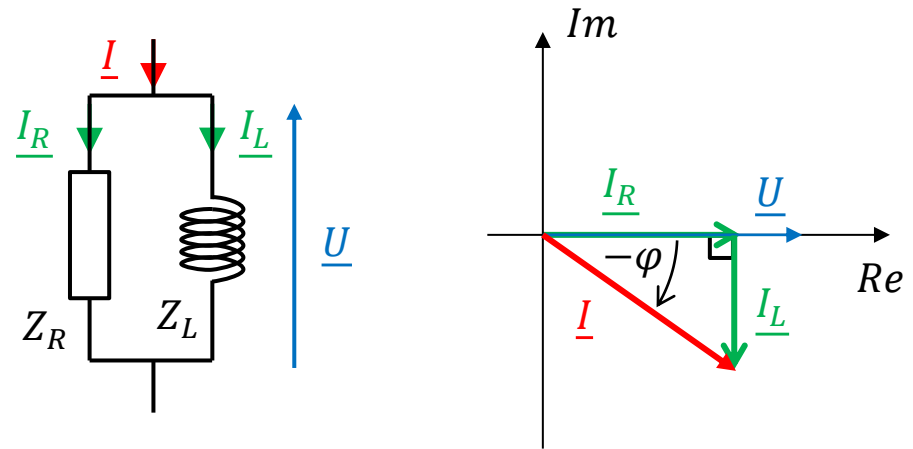
$$\tan(\varphi) = \frac{|U_L|}{|U_R|} = \frac{L\omega \cdot |I|}{R|I|} = \frac{L\omega}{R} \Rightarrow \varphi = \text{atan}\left(\frac{L\omega}{R}\right)$$

$$U^2 = U_R^2 + U_L^2 = (R \cdot I)^2 + (L\omega \cdot I)^2 \Rightarrow U = \sqrt{R^2 + (L\omega)^2} \cdot I = |Z_{eq}| \cdot I$$



Associations de dipôles

- Résistance en parallèle avec une inductance
- $\underline{I} = \underline{I}_R + \underline{I}_L = \frac{1}{R} \cdot \underline{U} + \frac{1}{jL\omega} \cdot \underline{U}$
- $\underline{U} = \underline{Z}_{eq} \cdot \underline{I}$ avec $\underline{Z}_{eq} = \frac{1}{\frac{1}{R} + \frac{1}{jL\omega}} = \frac{R \cdot jL\omega}{R + jL\omega}$
- $\underline{Z}_{eq} = Z_{eq} \cdot e^{j\varphi}$
- Relations entre ces grandeurs :



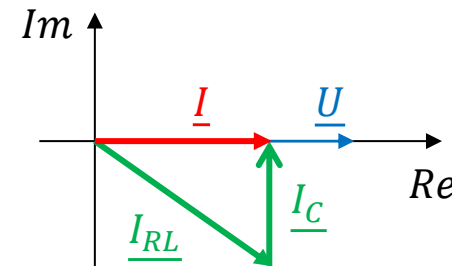
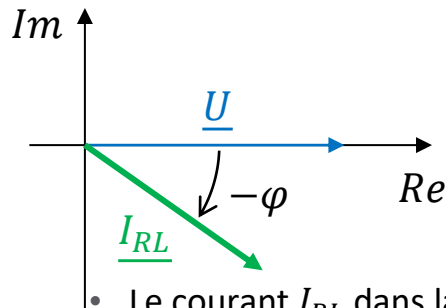
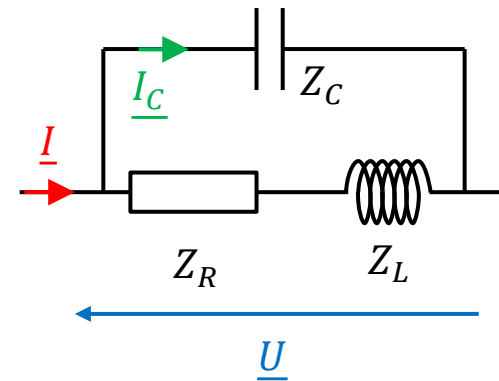
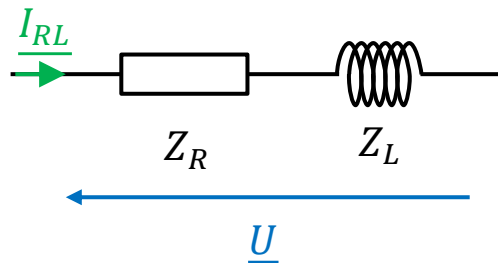
$$\tan(-\varphi) = \frac{|\underline{I}_L|}{|\underline{I}_R|} = \frac{1/L\omega \cdot |\underline{U}|}{1/R \cdot |\underline{U}|} = \frac{R}{L\omega} \quad \Rightarrow \quad -\varphi = \text{atan}\left(\frac{R}{L\omega}\right)$$

$$I^2 = I_R^2 + I_L^2 = \left(\frac{1}{R} \cdot U\right)^2 + \left(\frac{1}{L\omega} \cdot U\right)^2 \quad \Rightarrow \quad I = \sqrt{\left(\frac{1}{R}\right)^2 + \left(\frac{1}{L\omega}\right)^2} \cdot U$$



Exemple : redressement du facteur de puissance d'une machine synchrone

- Exemple précédent : une machine synchrone de 5 kW sous 230 V
 - Besoin de 28,8 A avec un facteur de puissance $\cos(\varphi) = 0,84$ (charge R-L)
 - Besoin de 24,2 A avec un facteur de puissance redressé ($\cos(\varphi) = 1$)



- Le courant I_{RL} dans la machine n'a pas changé, mais le courant I a diminué



Systemes triphasés

Nicolas DAMAY
Maître de conférences
Département IM

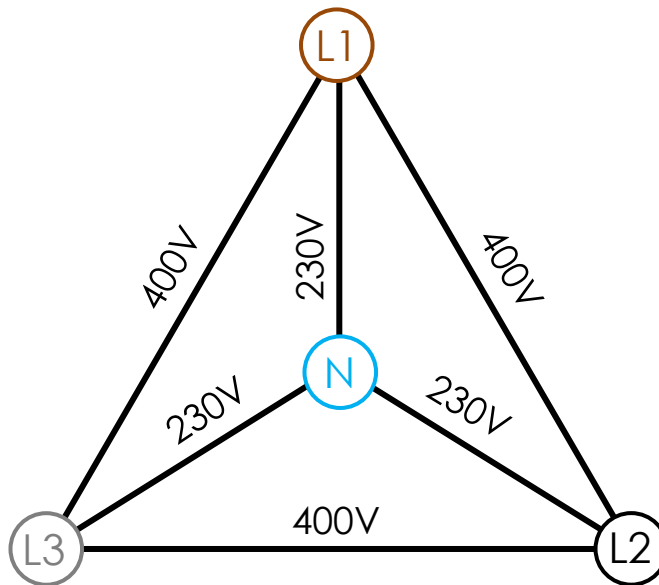
www.utc.fr
nicolas.damay@utc.fr

Cours SY03 : systemes monophasé et triphasé



Intérêt des systèmes triphasés

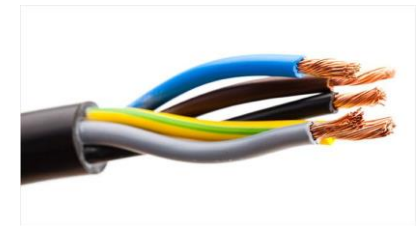
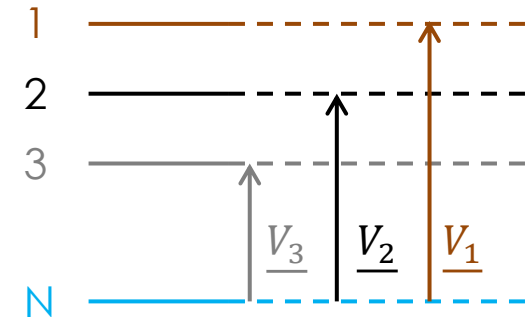
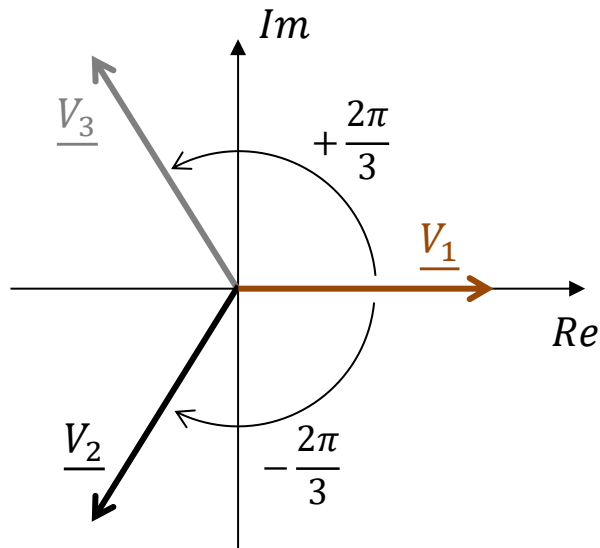
- Meilleures puissances massiques et rendements pour les machines électriques
 - Le monophasé est donc réservé aux faibles puissances
- Puissance transmise avec deux fois moins de cuivre qu'en monophasé
 - Somme instantanée des courants ≈ 0
 - Donc : pas besoin de fil de retour comme en monophasé => économies





Système triphasé équilibré

- Ensemble de trois tensions sinusoïdales décalées dans le temps
- Si le système est équilibré, alors les trois tensions ont la même valeur efficace et leurs déphasages sont égaux (120° ou $2\pi/3$ rad).
- **Tensions simples :**
 - L1 : $V_1(t) = V \sin(\omega t)$ (référence de phase)
 - L2 : $V_2(t) = V \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)$
 - L3 : $V_3(t) = V \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) = V \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right)$



Câble triphasé

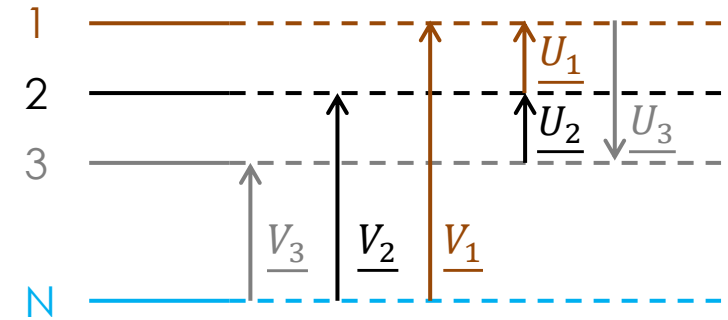
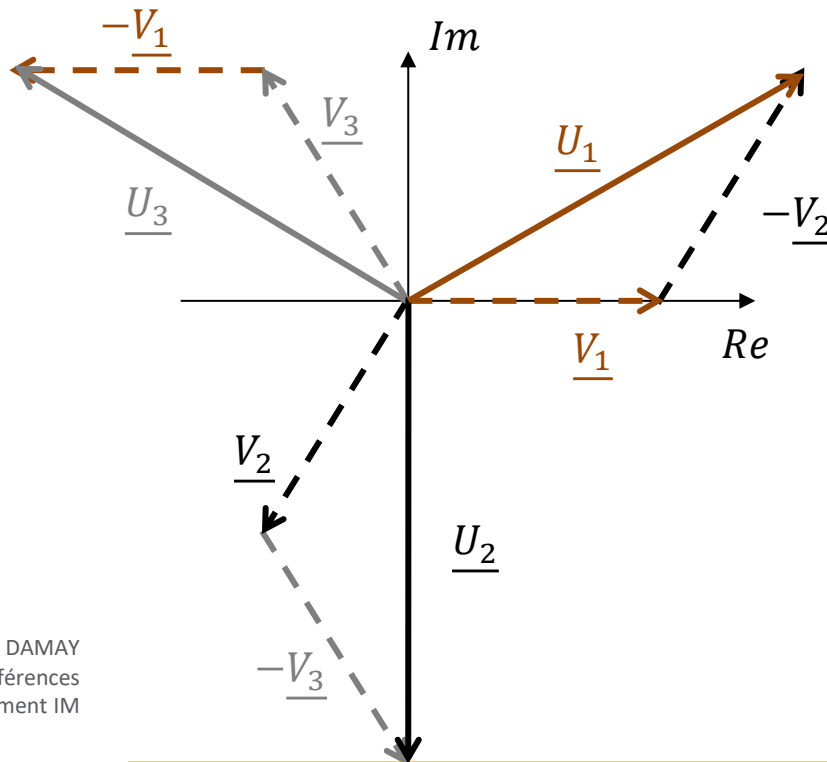
On peut prouver que :

$$\underline{V_1} + \underline{V_2} + \underline{V_3} = 0$$



Tensions simples et tensions composées

- Possibilité d'utiliser les tensions entre phases
- On parle alors de **tensions composées** :
 - $\underline{U}_1 = \underline{V}_1 - \underline{V}_2$
 - $\underline{U}_2 = \underline{V}_2 - \underline{V}_3$
 - $\underline{U}_3 = \underline{V}_3 - \underline{V}_1$



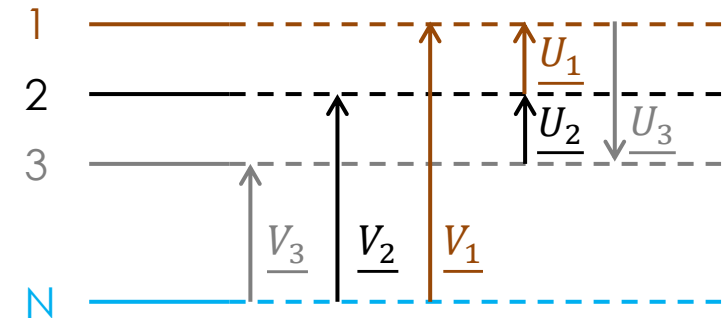
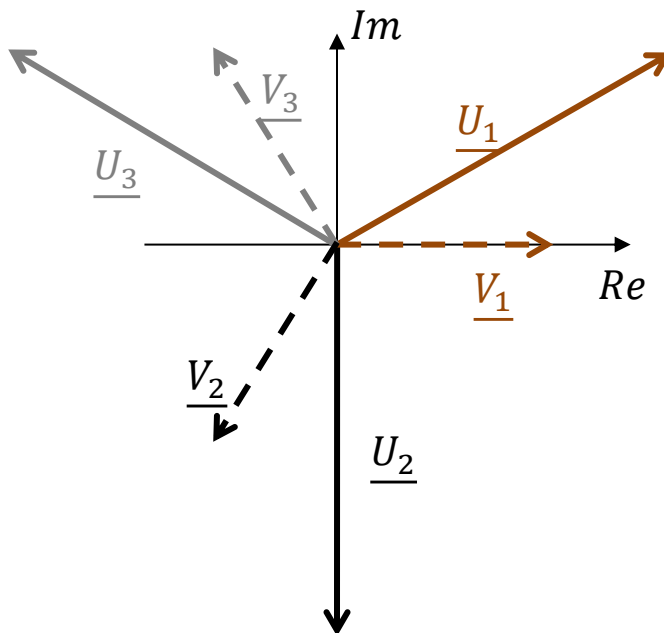
On peut prouver que :

$$\underline{U}_1 + \underline{U}_2 + \underline{U}_3 = 0$$



Système triphasé équilibré

- On parle alors de **tensions composées** :
- $\underline{U}_1 = \underline{V}_1 - \underline{V}_2$, soit $\underline{U}_1 = \sqrt{3} \cdot V \cdot e^{j\frac{\pi}{6}}$
- $\underline{U}_2 = \underline{V}_2 - \underline{V}_3$, soit $\underline{U}_2 = \sqrt{3} \cdot V \cdot e^{j\frac{5\pi}{6}}$
- $\underline{U}_3 = \underline{V}_3 - \underline{V}_1$, soit $\underline{U}_3 = \sqrt{3} \cdot V \cdot e^{-j\frac{\pi}{2}}$

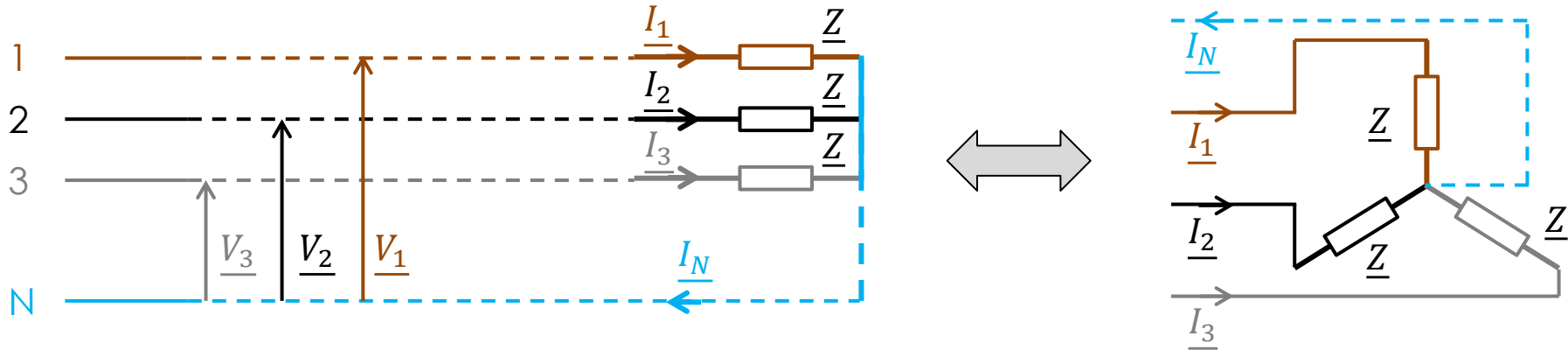


Tensions simples V vs composées U

- Déphasage de $\pi/6$
- $U = \sqrt{3} V$
- Rmq : U plus accessible à la mesure que V
 - Parfois pas de fil de neutre



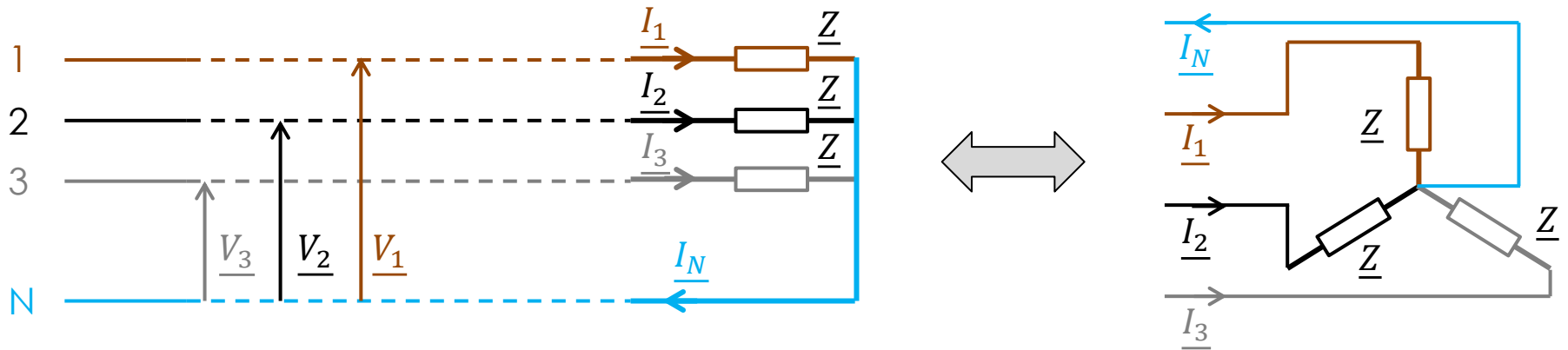
Branchement d'une charge triphasée (couplage étoile Y)



- Charge triphasée équilibrée : même impédance \underline{Z} sur chaque branche
- Ainsi : $\underline{V}_1 + \underline{V}_2 + \underline{V}_3 = \underline{Z} \cdot \underline{I}_1 + \underline{Z} \cdot \underline{I}_2 + \underline{Z} \cdot \underline{I}_3 = 0$
- Donc $\underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_3 = \underline{I}_N = 0 \Rightarrow$ pas de courant dans le fil de neutre
 - Le fil de neutre peut être supprimé !
 - En pratique, les systèmes sont toujours déséquilibrés, mais cela dépasse le cadre de SY03...



Branchement d'une charge triphasée (couplage étoile Y)

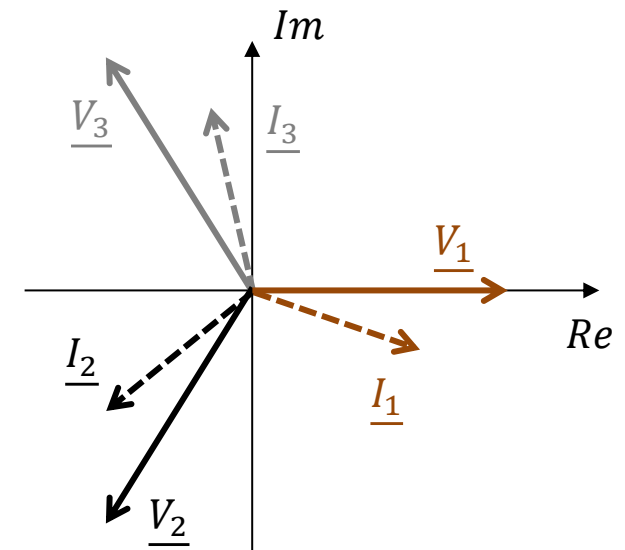


Représentation vectorielle (couplage Y)

- Mêmes principes qu'en monophasé
- Chaque courant est déphasé / sa tension

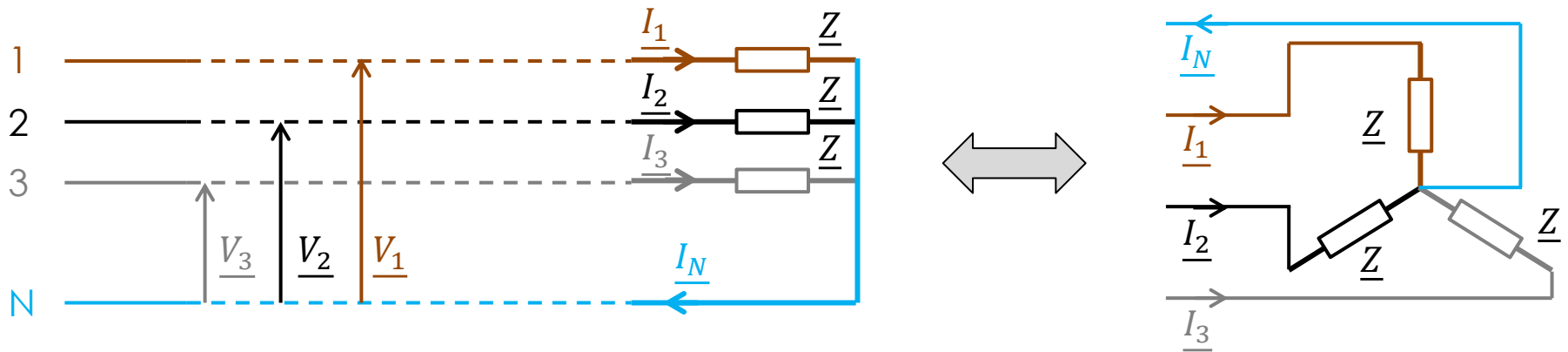
$$\underline{Z} = \frac{V_1}{I_1} = \frac{V_2}{I_2} = \frac{V_3}{I_3}$$

- On constate graphiquement que $\underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_3 = \underline{I}_N = 0$



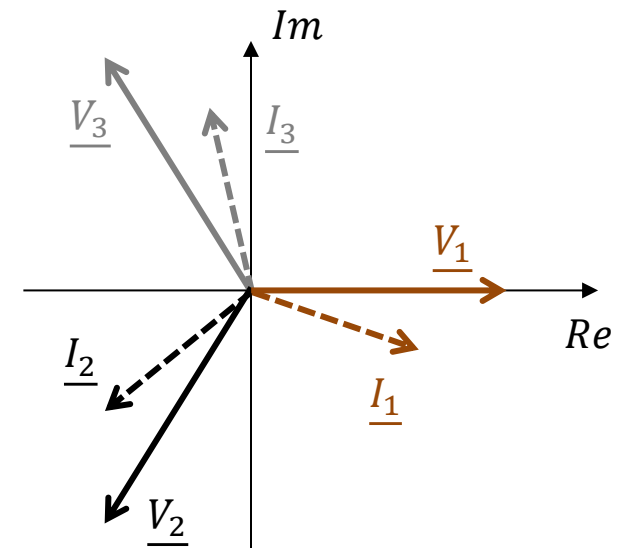


Branchement d'une charge triphasée (couplage étoile Y)



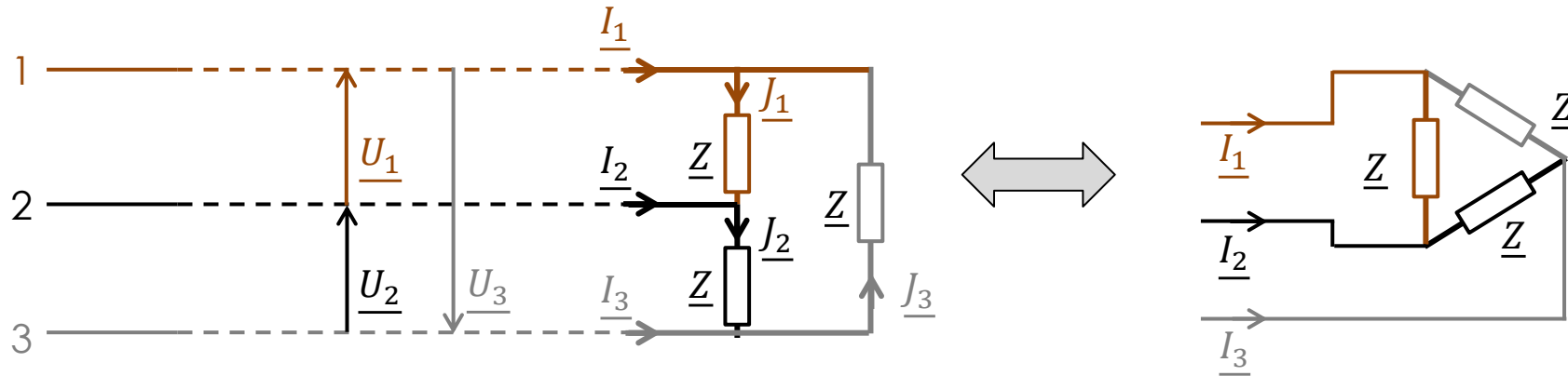
Puissance en triphasé (couplage Y)

- Somme des puissances des trois phases
- $P_1 = V_1 \cdot I_1 \cdot \cos(\varphi) = P_2 = P_3$
- D'où la puissance totale :
- $P = 3 V_1 \cdot I_1 \cdot \cos(\varphi) = 3 V \cdot I \cdot \cos(\varphi)$
- **ATTENTION : souvent on ne peut pas mesurer V car il n'y a pas de fil de neutre, mais on peut toujours mesurer U**
- **Alors : $P = 3 V \cdot I \cdot \cos(\varphi) = \sqrt{3} U \cdot I \cdot \cos(\varphi)$**





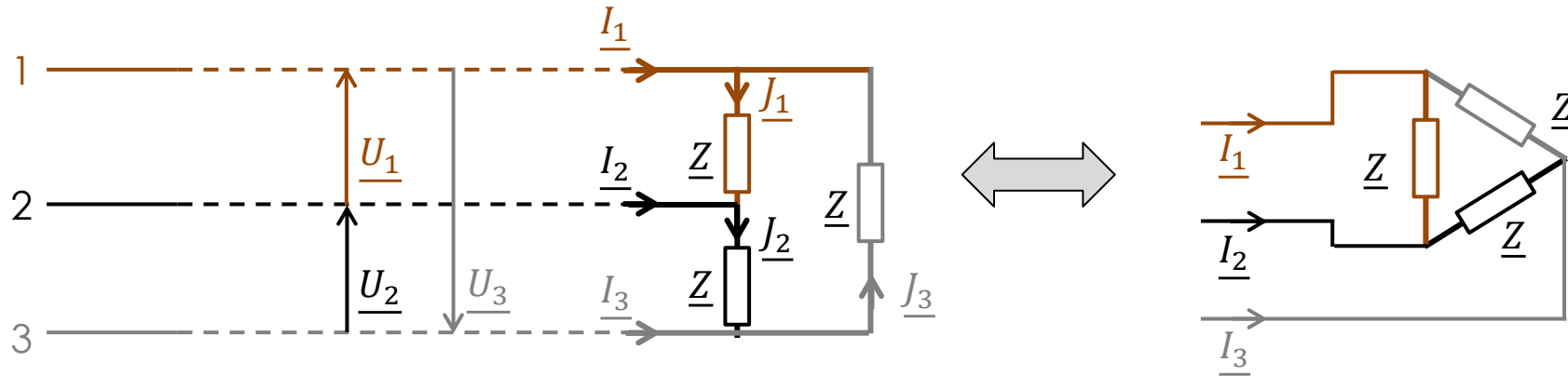
Branchement d'une charge triphasée (couplage triangle Δ)



- Charge triphasée équilibrée : même impédance \underline{Z} sur chaque branche
- Ainsi : $\underline{U}_1 = \underline{Z} \cdot \underline{J}_1$ et $\underline{U}_2 = \underline{Z} \cdot \underline{J}_2$ et $\underline{U}_3 = \underline{Z} \cdot \underline{J}_3$
- Or, on peut montrer, par un diagramme de Fresnel, que $I = \sqrt{3} \cdot J$
- Remarque : $U \times J = \sqrt{3} \cdot V \times \frac{I}{\sqrt{3}} = V \times I$



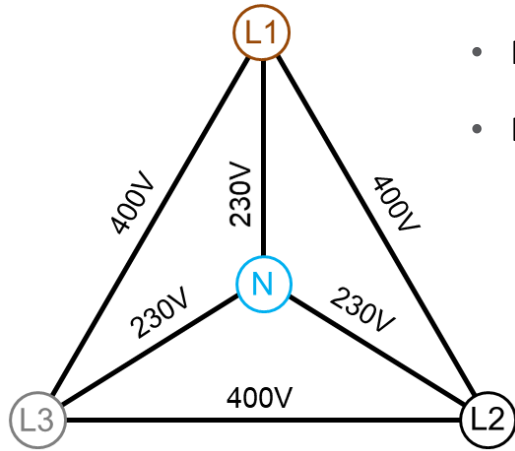
Branchement d'une charge triphasée (couplage triangle Δ)



- On peut définir la puissance électrique fournie à une machine triphasée par :
- $P_{elec} = 3 V I \cos(\varphi) = 3 U J \cos(\varphi)$
- Cependant, on utilise généralement U et I dans les catalogues de machine car ces valeurs sont facilement accessibles à la mesure.
- Dans ce cas : $P_{elec} = \sqrt{3} U I \cos(\varphi)$ (comme avec un couplage étoile)



Extrait de catalogue Leroy Somer



- Machine asynchrone de facteur de puissance $\cos(\varphi) = 0,84$
- Disponible en plusieurs versions :
 - Δ 230 V : branchement en triangle avec des tensions composées de 230 V
 - Y 400 V : branchement en étoile avec des tensions composées de 400 V
 - Δ 400 V : branchement en triangle avec des tensions composées de 400 V

Même version

Version différente

2
poles
3000 min⁻¹

IP 23
Cl. F - ΔT 80 K
MULTI-TENSION

• Cas du Y 400 V

- Puissance mécanique : 30 kW
- Puissance électrique : $P = \sqrt{3} \times 400 \times 57,2 \times 0,84 = 33,3 \text{ kW}$
- Rendement = 0,9

RÉSEAU Δ 230 / Y 400 V ou Δ 400 V 50 Hz

Type	Puissance nominale* P_N kW	Vitesse nominale N_N min ⁻¹	Moment nominal M_N N.m	Intensité nominale I_N (400 V) A	Facteur de puissance** $\cos \varphi$ 4/4	Rendement CEI 60034-2 1996*** η	Courant démarrage / Courant nominal I_D / I_N	Moment démarrage / Moment nominal M_D / M_N	Moment maximal / Moment nominal M_M / M_N	Moment d'inertie J kg.m ²	Masse IM B3 kg	Bruit LP db(A)
PLS 180 M	30	2936	97,6	57,2	0,84	90,1	7,5	2,6	3,3	0,054	102	78

[catalogue Leroy Somer 2010]