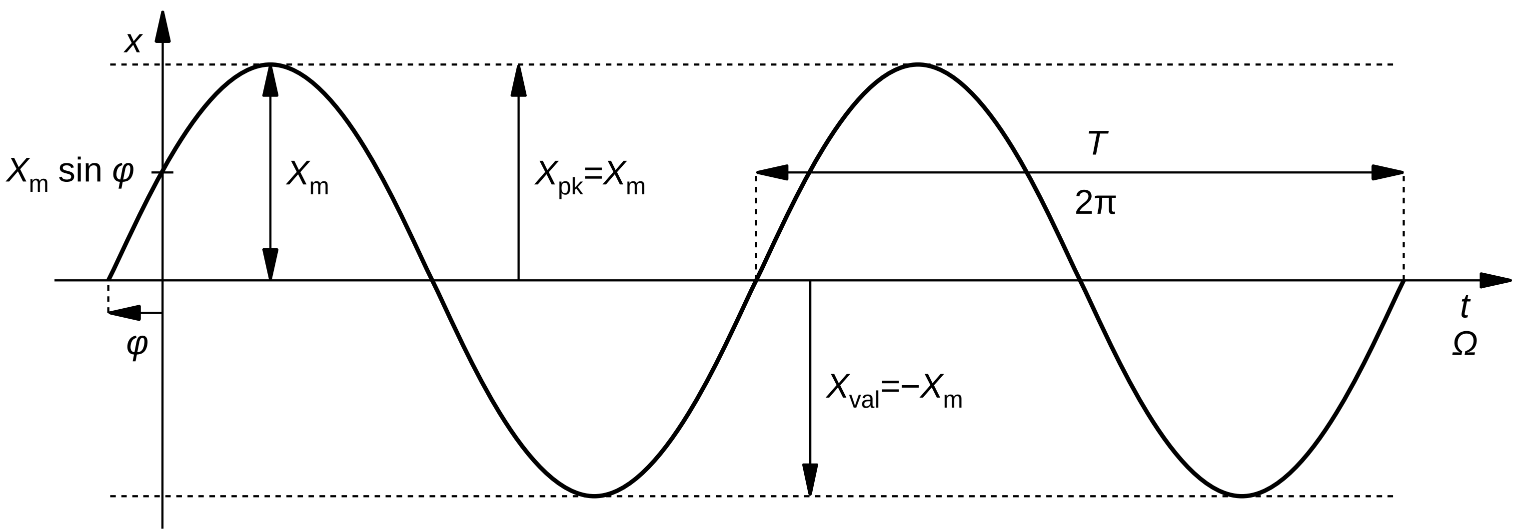
Description d'une grandeur sinusoïdale

- Formule mathématique

$$x = X_m \sin(\omega t + \varphi)$$

  - X_m : **amplitude** (ou valeur maximale, égale à la valeur de crête)
  - ω : **pulsation** = $2 \pi f$
  - φ : **phase à l'origine**
  - Le terme $\omega t + \varphi$ représente **phase** Ω qui est un angle
- Deux points du temps caractéristiques :
  - $t = 0$: $x = X_m \sin \varphi$ — φ est bien la phase à l'origine
  - $t = T$: $x = X_m \sin(2\pi + \varphi) = X_m \sin \varphi$ — $\Delta t = T$ correspond à $\Delta\Omega = 2\pi$



Valeur moyenne d'une grandeur sinusoïdale

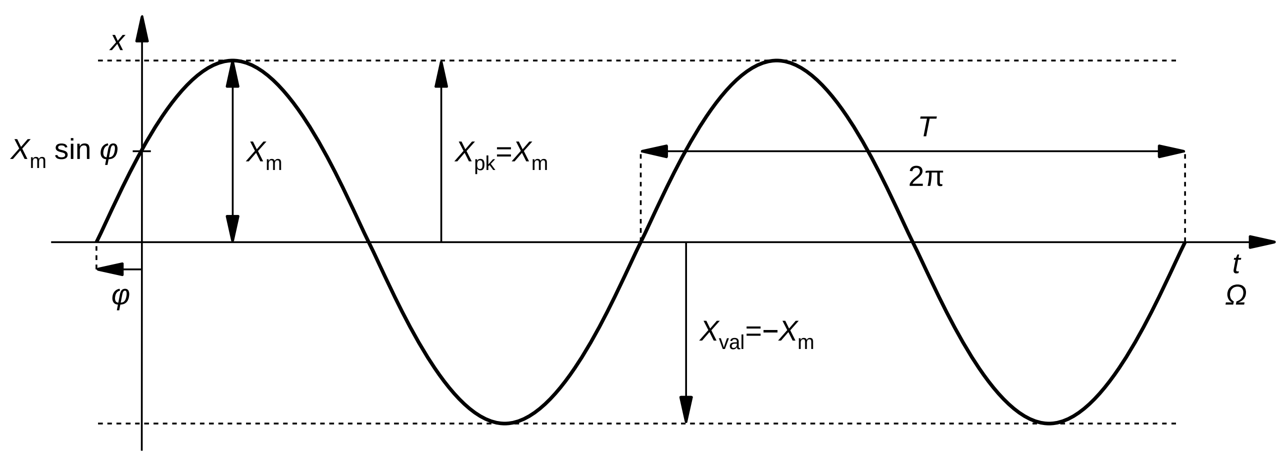
- La fonction sinus est symétrique par rapport à l'axe du temps, alors $|X_{pk}| = |X_{val}| = X_m$ et sa valeur moyenne est nulle

$$X_{av} = \frac{1}{T}\int_0^T X_m \sin(\omega t + \varphi)\,\mathrm{d}t = \frac{1}{T} X_m \left[-\frac{1}{\omega}\cos(\omega t + \varphi)\right]_0^T =$$

$$= -\frac{X_m}{T\omega}\left[\cos\left(\frac{2\pi}{T}T + \varphi\right) - \cos(0+\varphi)\right] = -\frac{X_m}{T\omega}[\cos(2\pi+\varphi) - \cos\varphi] =$$

$$= -\frac{X_m}{T\omega}[\cos\varphi - \cos\varphi] = 0$$

- $X_0 = 0$ alors une grandeur sinusoïdale est une grandeur **alternative**



Valeur efficace d'une grandeur sinusoïdale

- Pour simplifier le calcul, on assume $\varphi = 0$ et on intègre de 0 à T
  - Ça ne change pas le résultat, car φ juste décale la fonction le long de l'axe t

$$X_{\mathrm{rms}} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T x^2 \,\mathrm{d}t} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T (X_{\mathrm{m}} \sin \omega t)^2 \,\mathrm{d}t} = X_{\mathrm{m}} \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T (\sin \omega t)^2 \,\mathrm{d}t}$$

- Selon une formule de calcul intégral

$$\int_0^T (\sin \omega t)^2 \,\mathrm{d}t = \left[\frac{t}{2} - \frac{1}{4\omega}\sin(2\omega t)\right]_0^T =$$

$$= \left[\frac{T}{2} - \frac{1}{4\omega}\sin\left(\frac{2\pi}{T}T\right)\right] - \left[\frac{0}{2} - \frac{1}{4\omega}\sin 0\right] = \frac{T}{2}$$

- Finalement :

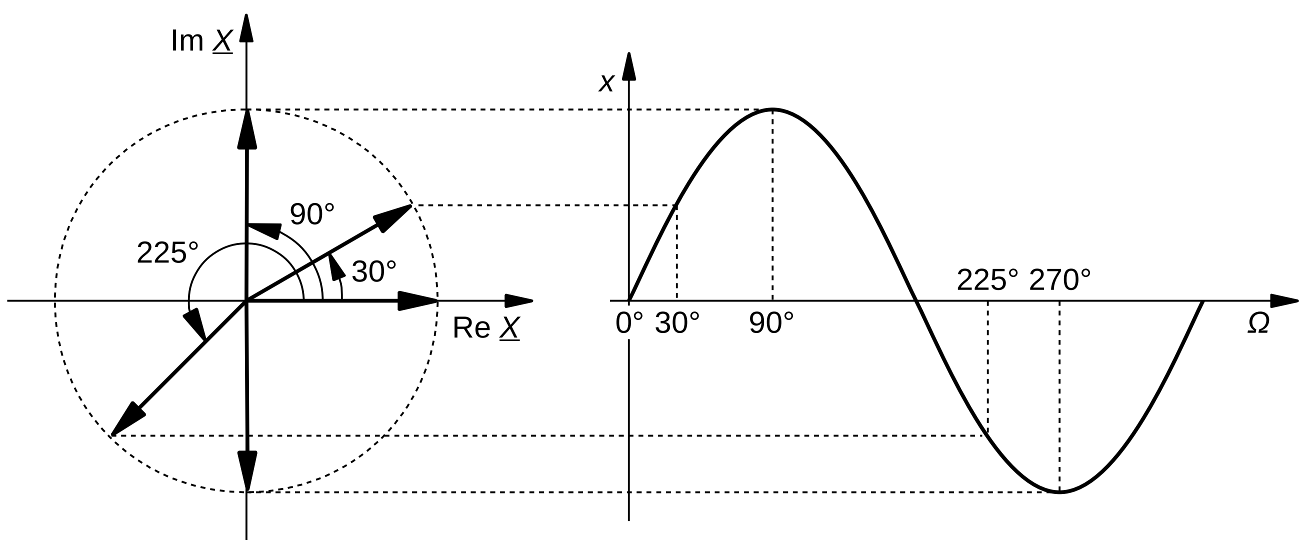
$$X_{\mathrm{rms}} = X_{\mathrm{m}} \sqrt{\frac{1}{T}\frac{T}{2}} = \frac{X_{\mathrm{m}}}{\sqrt{2}} \approx \frac{X_{\mathrm{m}}}{1{,}41} \quad \text{ou} \quad 0{,}707\, X_{\mathrm{m}}$$

Exercices

- 4.3.1. Calculer l'amplitude de la tension sinusoïdale d'alimentation du réseau basse tension européen où la valeur efficace est de 230 V.
- 4.3.2. Calculer le courant efficace nominal d'une ampoule dont la tension nominale est de 230 V et la puissance nominale est de 35 W.
- 4.3.3. L'entrée d'un appareil de mesure peut être représentée comme une résistance de 50 Ω. Déterminer la valeur efficace et l'amplitude maximales d'une tension sinusoïdale appliquée à cette entrée si la puissance admissible y dissipée est de 0,5 W.

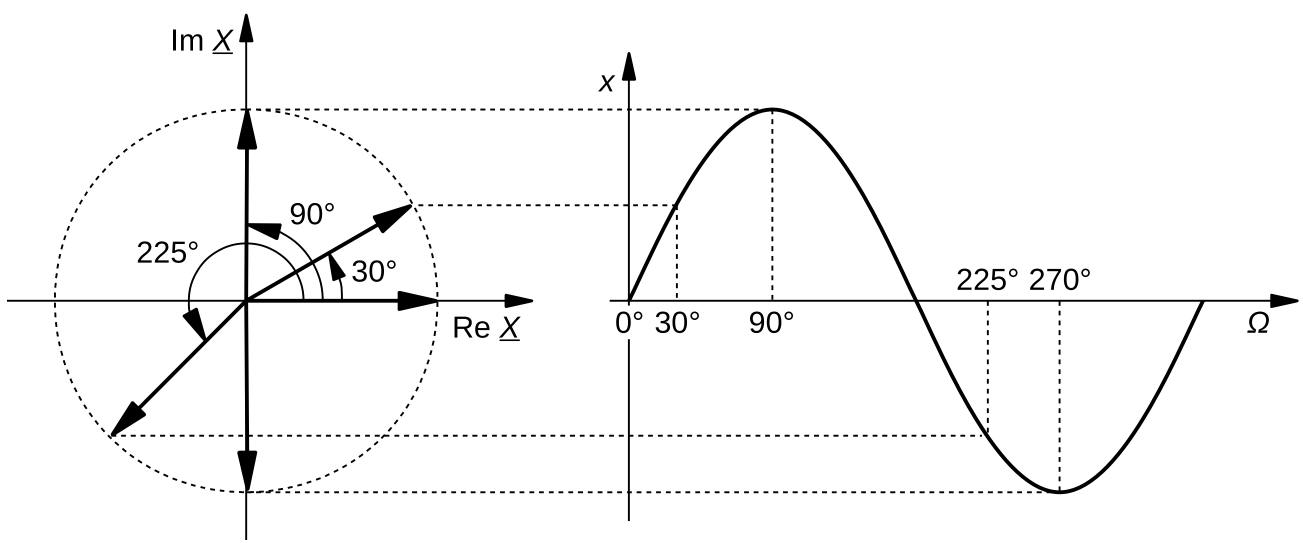
Représentation des grandeurs sinusoïdales avec les phaseurs

- Une grandeur sinusoïdale peut être représentée avec un vecteur correspondant appelé **phaseur** (ou vecteur de Fresnel)
  - La longueur du phaseur = valeur efficace X de la grandeur x en jeu
  - L'angle que forme le phaseur avec l'axe horizontale = phase Ω de la grandeur x
- En principe, un phaseur tourne constamment dans le temps
  - Le nombre de révolutions du phaseur par seconde est équivalent à la fréquence de la grandeur en jeu
  - Par convention, le sens de cette rotation est antihoraire



Représentation des grandeurs sinusoïdales avec les phaseurs (suite)

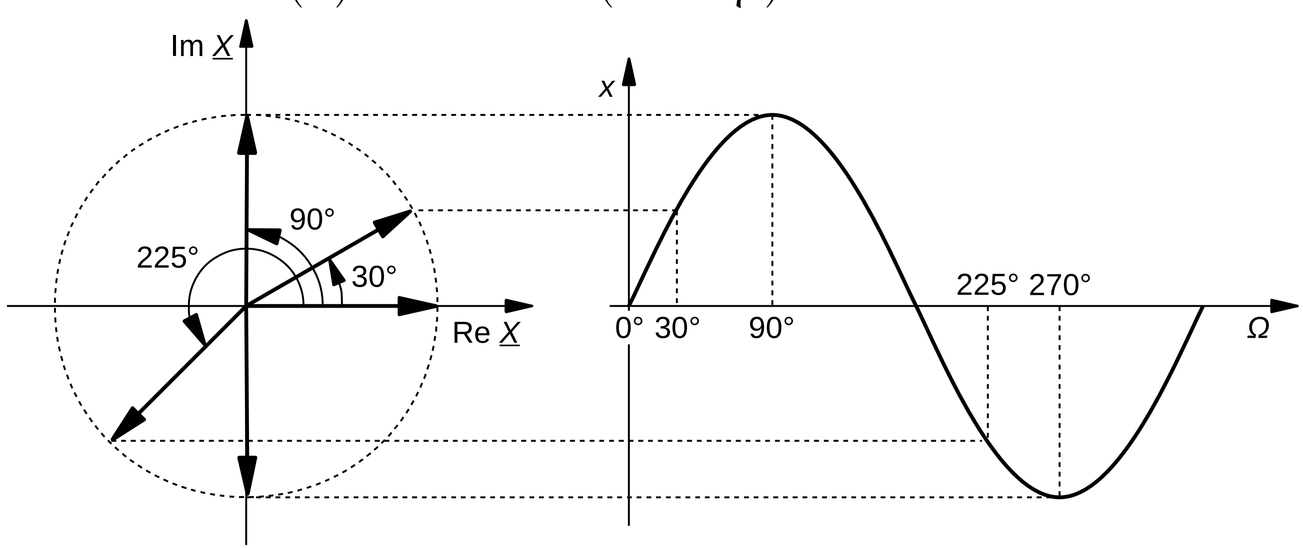
- La composante verticale du phaseur est égale à sa longueur multipliée par sinus de la phase actuelle Ω
  - Cela découle directement de la définition de la fonction sinus
  - Elle correspond alors à la valeur de la grandeur en jeu au moment donné
  - En fait, il faut encore multiplier le résultat par √2 car (par convention) la longueur du phaseur, c'est sa valeur efficace et non pas son amplitude
- Plus pratique : supposer que c'est le système de coordonnées qui tourne (dans le sens horaire) tandis que les phaseurs sont immobiles
  - Nécessite que toutes les grandeurs possédaient une même fréquence



Représentation des grandeurs sinusoïdales avec les nombres complexes

- **Formule d'Euler** :
  $$X\,e^{j\Omega} = X\cos\Omega + j\,X\sin\Omega$$
  À rebours :
  $$X\sin\Omega = \operatorname{Im}\left\{X\,e^{j\Omega}\right\}$$
  $$X\sin\Omega = X\sin(\omega t+\varphi) = \operatorname{Im}\left\{X\,e^{j(\omega t+\varphi)}\right\} = \operatorname{Im}\left\{X\,e^{j\omega t}e^{j\varphi}\right\}$$
- Plus pratique : l'équivalent de la supposition de l'immobilité des phaseurs, c'est de négliger la composante variable ωt
  - On garde en mémoire que la grandeur varie dans le temps mais on néglige ce fait dans sa représentation géométrique ou algébrique
  - Toujours on utilise la valeur efficace comme le module du nombre complexe

$$x(t) = X\sqrt{2}\sin(\omega t+\varphi) \;\Leftrightarrow\; \underline{X} = X\,e^{j\varphi}$$



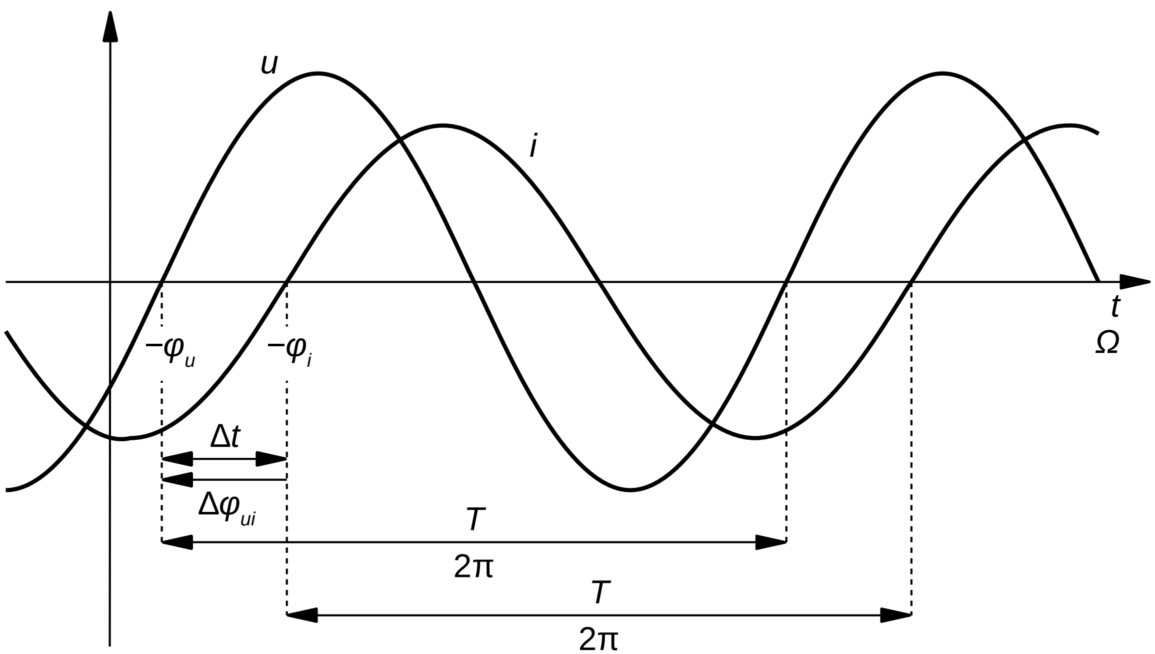
Déphasage

- Le **déphasage** est le décalage entre deux formes d'onde exprimé en termes de la phase
- Il est égal à la différence des phases aux origines

$$\Delta\varphi_{12}=\varphi_1-\varphi_2=-\Delta\varphi_{21}$$

  - Par convention, pour le courant et la tension d'un dipôle, c'est le déphasage de la tension par rapport au courant (son signe est donc important) :

$$u(t)=U_\mathrm{m}\sin(\omega t+\varphi_u)$$
$$i(t)=I_\mathrm{m}\sin(\omega t+\varphi_i)$$
$$\varphi=\Delta\varphi_{ui}=\varphi_u-\varphi_i$$

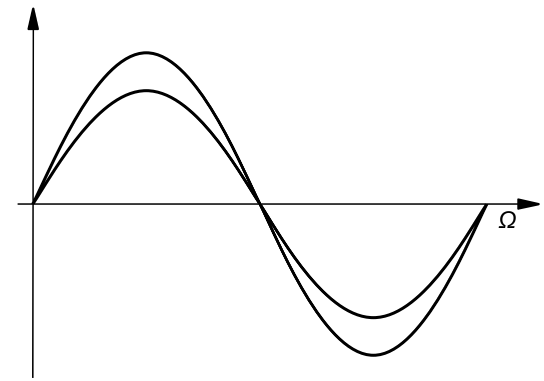


- Prenant en compte que la période T correspond à 2π ou 360° en termes de la phase :

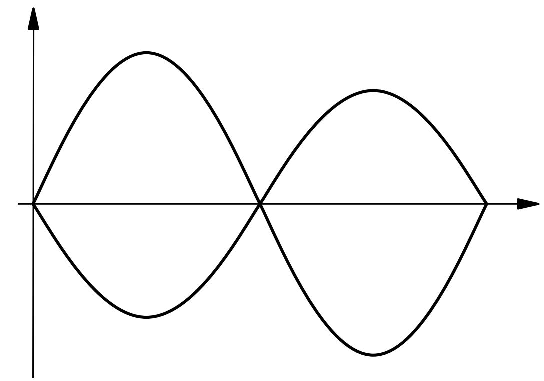
$$\frac{\Delta t}{T}=\frac{\Delta\varphi}{2\pi} \quad \text{ou} \quad \frac{\Delta\varphi}{360°}$$

Déphasages particuliers

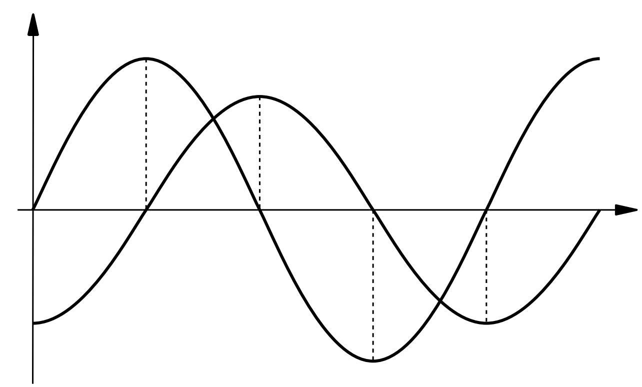
- Déphasage nul
  - $\Delta t = 0$
  - $\Delta\varphi = 0° = 0$
  - Grandeurs **en phase**



- Déphasage d'une demi période
  - $\Delta t = T/2$
  - $\Delta\varphi = 180° = \pi$
  - Grandeurs **en opposition de phase**



- Déphasage d'un quart période
  - $\Delta t = T/4$
  - $\Delta\varphi = 90° = \pi/2$
  - Grandeurs **en quadrature de phase**



Détermination du déphasage avec les phaseurs et avec les nombres complexes

- La phase à l'origine, c'est l'argument du nombre complexe associé

$$\varphi_u = \arg\{\underline{U}\} = \arctan\frac{\mathrm{Im}\,\underline{U}}{\mathrm{Re}\,\underline{U}}$$

$$\varphi_i = \arg\{\underline{I}\} = \arctan\frac{\mathrm{Im}\,\underline{I}}{\mathrm{Re}\,\underline{I}}$$

- En utilisant la représentation d'Euler

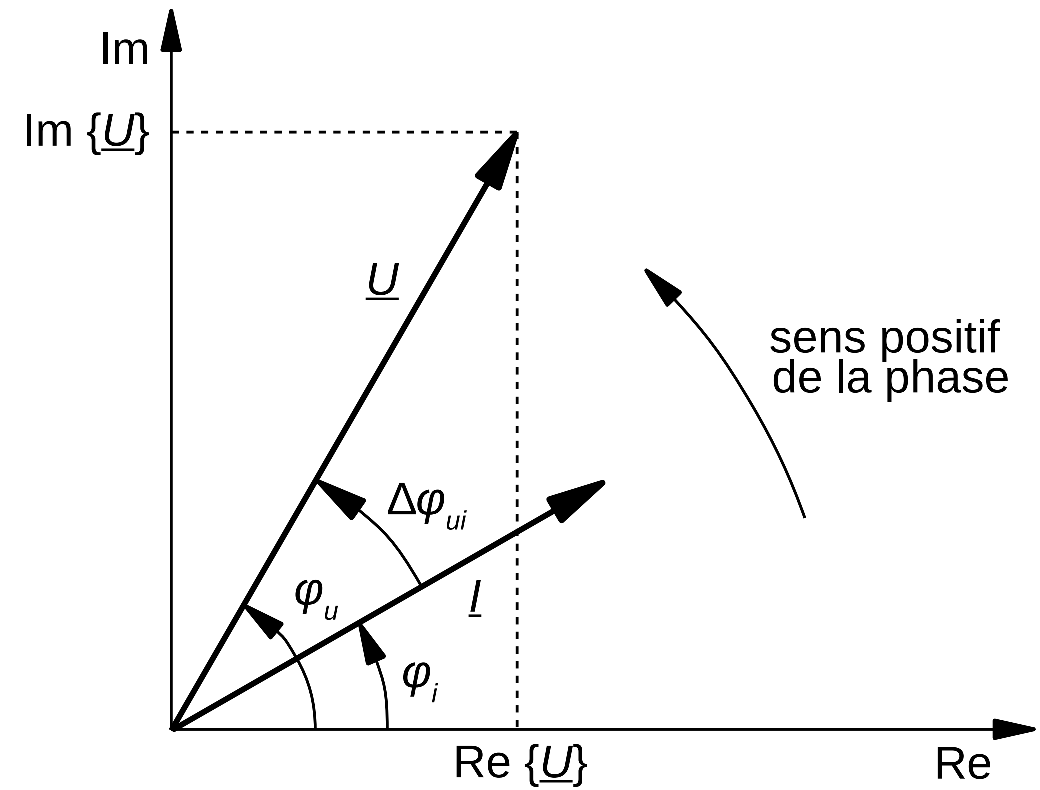
$$\underline{U} = U\,\mathrm{e}^{\mathrm{j}\varphi_u}$$

$$\underline{I} = I\,\mathrm{e}^{\mathrm{j}\varphi_i}$$

$$\frac{\underline{U}}{\underline{I}} = \frac{U}{I}\mathrm{e}^{\mathrm{j}(\varphi_u - \varphi_i)} = \frac{U}{I}\mathrm{e}^{\mathrm{j}\Delta\varphi_{ui}}$$

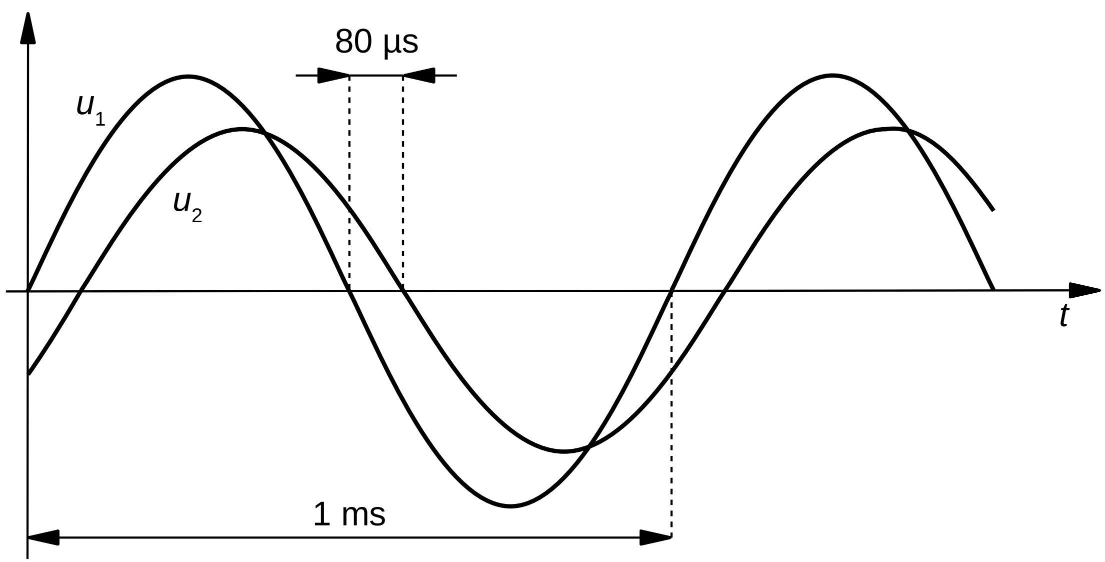
alors $\Delta\varphi_{ui} = \arg\left\{\frac{\underline{U}}{\underline{I}}\right\}$

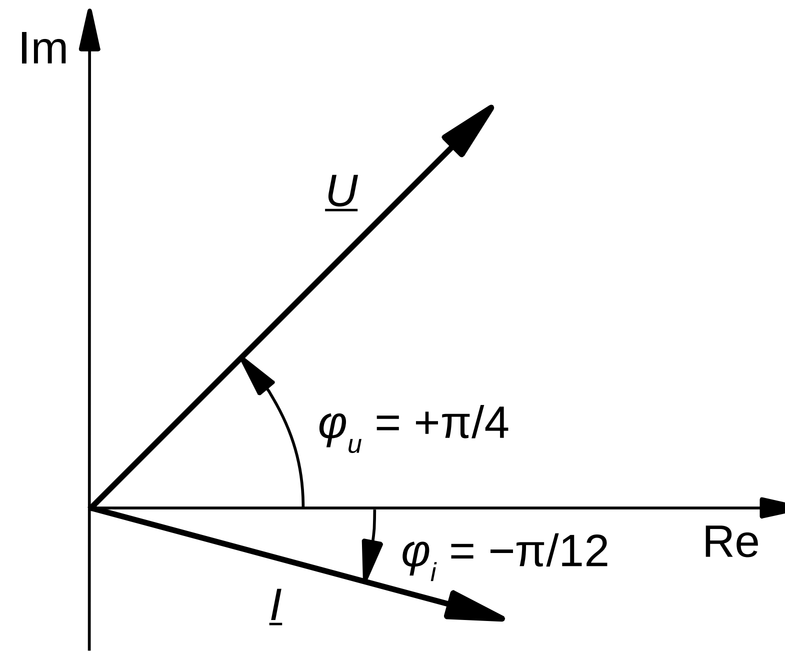
$$\Delta\varphi_{ui} = \varphi_u - \varphi_i$$



Exercices

- 4.4.1. Déterminer le nombre complexe associé pour la tension : $u(t) = (12\sqrt{2})\,\mathrm{V}\,\sin(\omega t + \pi/4)$
- 4.4.2. Déterminer le déphasage :
  a) de la tension u_2 par rapport à u_1 ; b) entre le courant et la tension

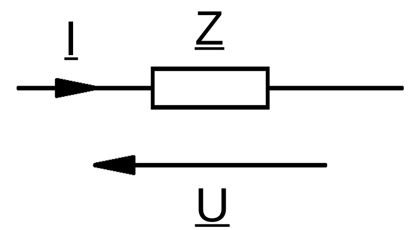




Impédance et admittance

- En régime sinusoïdal, c'est l'**impédance complexe** qui décrit la relation entre la tension et le courant d'un dipôle

$$\underline{Z} = \frac{\underline{U}}{\underline{I}}$$



  - Unité : ohm [Ω]
- C'est un nombre complexe

$$\underline{Z} = \frac{U\,\mathrm{e}^{\mathrm{j}\varphi_u}}{I\,\mathrm{e}^{\mathrm{j}\varphi_i}} = \frac{U}{I}\mathrm{e}^{\mathrm{j}\varphi_u}\mathrm{e}^{\mathrm{j}-\varphi_i} = \frac{U}{I}\mathrm{e}^{\mathrm{j}(\varphi_u-\varphi_i)} = Z\,\mathrm{e}^{\mathrm{j}\varphi} \quad\Rightarrow\quad |\underline{Z}| = Z = \frac{U}{I} = \frac{U_\mathrm{m}/\sqrt{2}}{I_\mathrm{m}/\sqrt{2}} = \frac{U_\mathrm{m}}{I_\mathrm{m}}$$

$$\arg \underline{Z} = \varphi = \varphi_u - \varphi_i$$

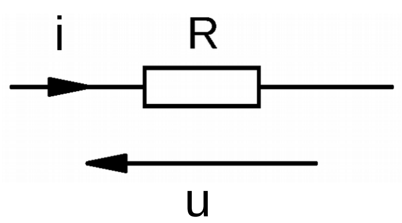
  - Son **module** exprime le rapport des valeurs efficaces (ou des amplitudes)
  - Son **argument** exprime le décalage en phase donc déphasage
- L'**admittance complexe** correspond à la conductance

$$\underline{Y} = \frac{\underline{I}}{\underline{U}} = \frac{1}{\underline{Z}} \qquad\Rightarrow\qquad Y = \frac{I}{U} = \frac{1}{Z} \qquad \arg \underline{Y} = \varphi_i - \varphi_u = -\arg \underline{Z}$$

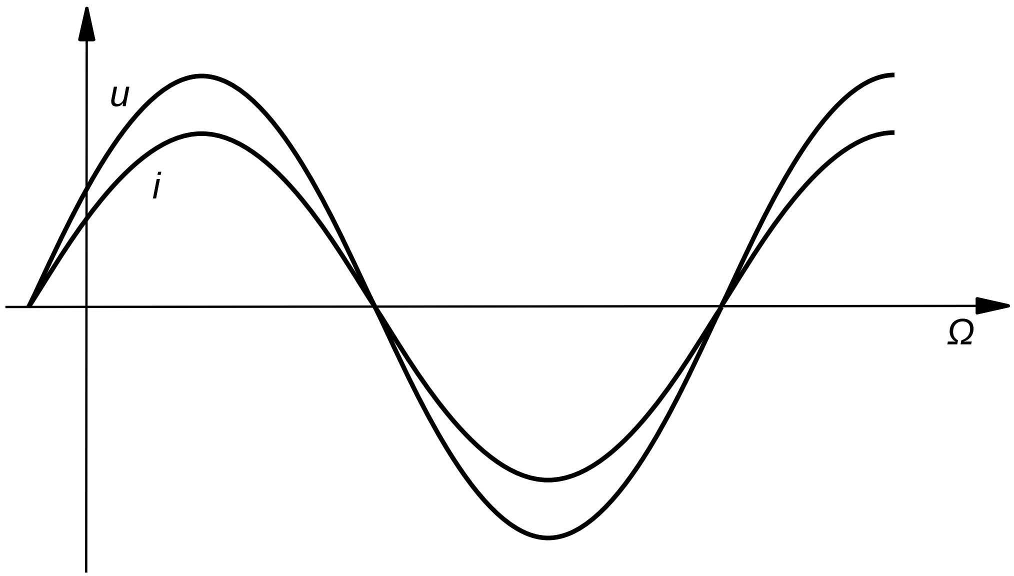
  - Unité : siemens [S]

Résistor parfait en régime sinusoïdal

- La loi d'Ohm s'appliquant aux valeurs instantanées, la tension est en phase avec le courant



$$u = R\,i$$



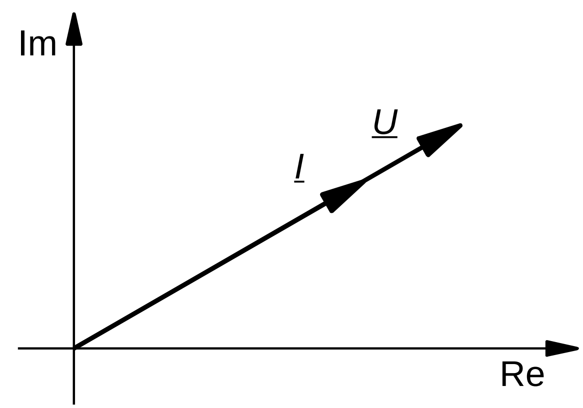
$$i = I\sqrt{2}\sin(\omega t + \varphi_i) \;\Rightarrow\; \underline{I} = I\,\mathrm{e}^{\mathrm{j}\varphi_i}$$

$$u = R\,I\sqrt{2}\sin(\omega t + \varphi_i) \;\Rightarrow\; \underline{U} = R\,I\,\mathrm{e}^{\mathrm{j}\varphi_i}$$

$$\underline{Z}_\mathrm{R} = \frac{\underline{U}}{\underline{I}} = R\,\mathrm{e}^{\mathrm{j}0} = R$$

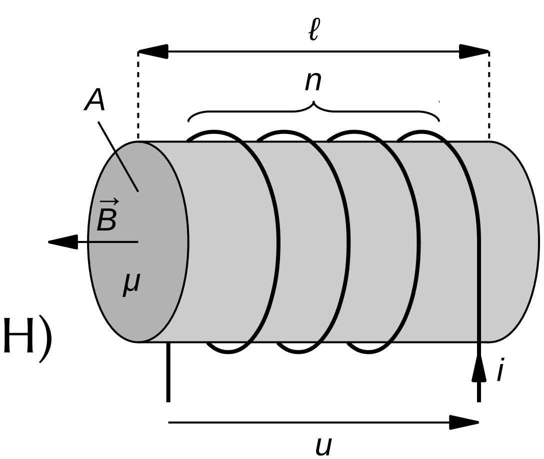
$$Z_\mathrm{R} = R \qquad \varphi_\mathrm{R} = 0$$

$$\underline{Y}_\mathrm{R} = \frac{1}{R} = G$$



Bobine

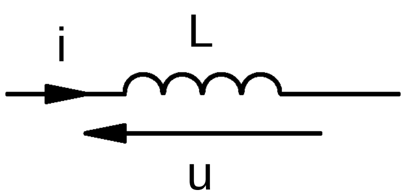
- Composant électrique basé sur un enroulement d'un fil conducteur
- Son fonctionnement découle de deux lois basiques de l'électromagnétisme (équations de Maxwell)
  - Loi de Faraday : un champ magnétique B variable (la bobine ne fonctionne pas en régime continu) induit un champ électrique et donc une tension
$$u = n A \frac{\mathrm{d} B}{\mathrm{d} t}$$
  - Loi d'Ampère : un courant traversant un fil induit un champ magnétique
$$B \ell = \mu n I$$



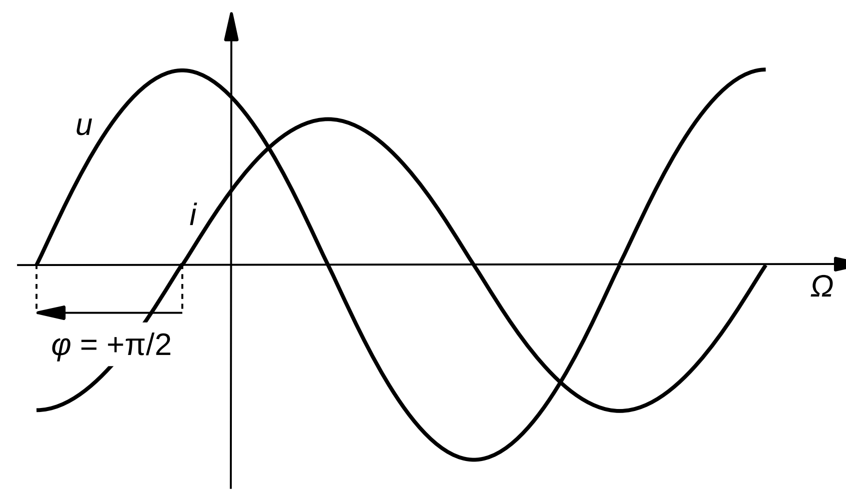
- En combinant, la relation courant-tension est
$$u = \frac{\mu n^2 A}{\ell} \frac{\mathrm{d} i}{\mathrm{d} t} = L \frac{\mathrm{d} i}{\mathrm{d} t}$$
  - L : **inductance** (unité : henry [H], typiquement nH...mH)
  - μ : **perméabilité magnétique** [H/m]
- Dans le champs magnétique, une énergie est accumulée
$$E = \frac{1}{2} L i^2$$

Comportement électrique de la bobine

- L'impédance d'une bobine augmente avec la fréquence
- Elle ne permettra un courant d'une haute fréquence de la traverser
- Elle s'opposera à des changements rapides du courant



$$u=L\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}$$



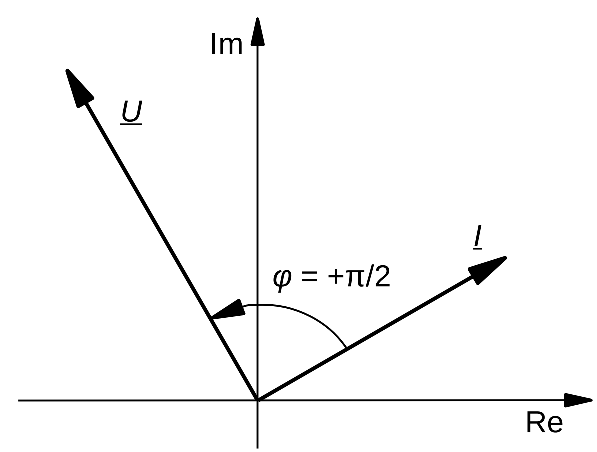
$$i=I\sqrt{2}\sin\left(\omega t+\varphi_i\right)\;\Rightarrow\;\underline{I}=I\,\mathrm{e}^{\mathrm{j}\varphi_i}$$

$$u=L\,I\sqrt{2}\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\sin\left(\omega t+\varphi_i\right)=L\,I\sqrt{2}\,\omega\cos\left(\omega t+\varphi_i\right)=$$

$$=\omega\,L\,I\sqrt{2}\sin\left(\omega t+\varphi_i+\frac{\pi}{2}\right)\;\Rightarrow\;\underline{U}=\omega\,L\,I\,\mathrm{e}^{\mathrm{j}\left(\varphi_i+\pi/2\right)}$$

$$\underline{Z}_\mathrm{L}=\frac{\underline{U}}{\underline{I}}=\omega\,L\,\mathrm{e}^{\mathrm{j}\pi/2}=\mathrm{j}\,\omega\,L \qquad \underline{Y}_\mathrm{L}=\frac{1}{\mathrm{j}\,\omega\,L}=-\frac{\mathrm{j}}{\omega\,L}$$

$$Z_\mathrm{L}=\omega\,L \qquad \varphi_\mathrm{L}=+\frac{\pi}{2}$$

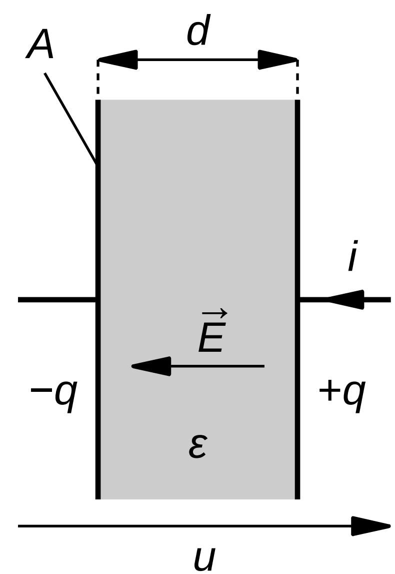


Condensateur

- Matériaux diélectriques
  - Ne contiennent pas de charges mobiles $\Rightarrow$ courant continu impossible
  - Un champ électrique y peut apparaître grâce aux dipôles électriques
- Condensateur plan : la plus simple structure idéalisée
  - Avec u constant, une charge proportionnelle accumule : positive q à la borne positive et négative de la même valeur q, à la borne négative
  - Si u change, alors q doit changer $\Rightarrow$ il y aura un mouvement de charge, donc un flux de courant $\Rightarrow$ avec une tension variable, un courant circulera
- Relation courant-tension

$$q = C\,u \quad \Rightarrow \quad \frac{\mathrm{d}\,q}{\mathrm{d}\,t} = i = C\,\frac{\mathrm{d}\,u}{\mathrm{d}\,t}$$

$$C = \frac{\varepsilon\,A}{d}$$

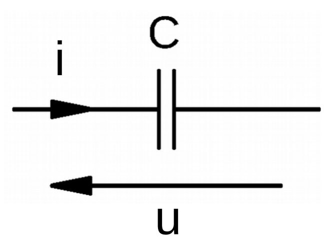


  - C : **capacité** (unité : farad [F], typiquement pF…µF)
  - ε : **permittivité diélectrique** [F/m]
- Énergie accumulée dans le champ électrique

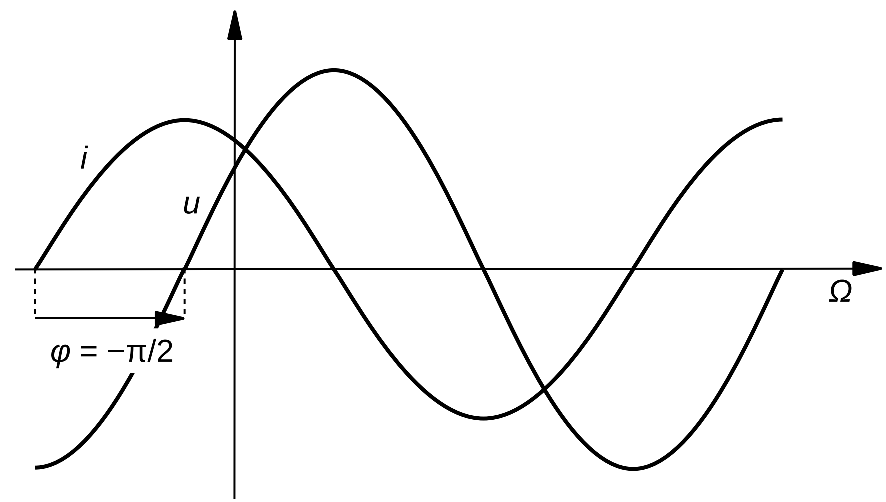
$$E = \frac{1}{2} C u^2$$

Comportement électrique du condensateur

- L'impédance d'un condensateur diminue avec la fréquence
- Elle laissera un courant d'une haute fréquence de la traverser facilement sans une importante chute de tension correspondante
- Elle s'opposera à des changements rapides de la tension



$$i = C\frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}t}$$



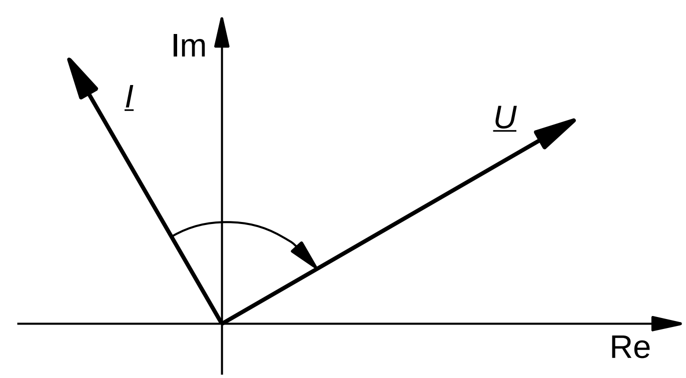
$$u = U\sqrt{2}\sin(\omega t + \varphi_u) \;\Rightarrow\; \underline{U} = U\,\mathrm{e}^{\mathrm{j}\varphi_u}$$

$$i = C\,U\sqrt{2}\,\omega\cos(\omega t + \varphi_u) =$$

$$= \omega C U\sqrt{2}\sin\left(\omega t + \varphi_u + \frac{\pi}{2}\right) \;\Rightarrow\; \underline{I} = \omega C U\,\mathrm{e}^{\mathrm{j}(\varphi_u + \pi/2)}$$

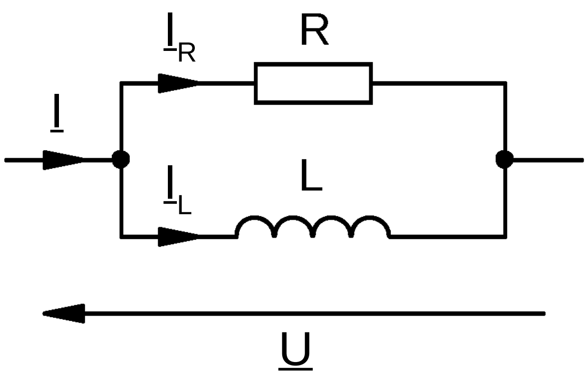
$$\underline{Z}_\mathrm{C} = \frac{\underline{U}}{\underline{I}} = \frac{1}{\omega C}\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\pi/2} = -\frac{\mathrm{j}}{\omega C} \qquad \underline{Y}_\mathrm{C} = \mathrm{j}\omega C$$

$$Z_\mathrm{C} = \frac{1}{\omega C} \qquad \varphi_\mathrm{C} = -\frac{\pi}{2}$$



Exercice

- 4.5.1. Le circuit ci-dessous est alimenté à partir d'une source de tension sinusoïdale $\underline{U}$. Avec un multimètre, on a mesuré I_R = 10 mA, I_L = 25 mA (valeurs efficaces). Déterminer la valeur efficace du courant $\underline{I}$ ainsi que son déphasage par rapport à la tension $\underline{U}$.



Circuits linéaires en régime sinusoïdal

- La bobine et le condensateur sont des composants linéaires
  - Ils sont décrits par des équations différentielles mais toujours linéaires
- Si toutes les sources dans un circuit linéaire sont sinusoïdales d'une fréquence donnée, alors toutes les tensions et tous les courants dans ce circuit sont également sinusoïdaux de la même fréquence
  - Il est possible d'utiliser leur représentation par phaseurs ou par nombres complexes
- Aux phaseurs ainsi qu'aux nombres complexes représentant des grandeurs sinusoïdales dans un circuit linéaire, s'appliquent :
  - la loi d'Ohm
  - les lois de Kirchhoff (la loi des nœuds, la loi des mailles)
  - les théorèmes de Norton et de Thévenin
  - le principe de superposition
  - donc aussi toutes les formules dérivées (diviseur de tension, diviseur de courant, association en série, association en parallèle...)

Associations de dipôles passifs linéaires en régime sinusoïdal

- Une association de dipôles passifs linéaires se comporte comme un dipôle passif linéaire
  - Elle peut être caractérisée par une impédance ou une admittance complexe équivalente
- À partir des lois de Kirchhoff, on reçoit
  - pour une association en série :

$$\underline{Z}_{\mathrm{eq}} = \sum_k \underline{Z}_k$$

  - pour une association en parallèle :

$$\underline{Y}_{\mathrm{eq}} = \sum_k \underline{Y}_k \quad \text{ou} \quad \frac{1}{\underline{Z}_{\mathrm{eq}}} = \sum_k \frac{1}{\underline{Z}_k}$$

- Comme l'impédance (ou l'admittance) équivalente peut être traité d'un dipôle à part, la loi d'Ohm s'y applique aux valeurs effectives

$$\underline{Z}_{\mathrm{eq}} = \frac{\underline{U}_{\mathrm{eq}}}{\underline{I}_{\mathrm{eq}}} \quad \text{mais également} \quad Z_{\mathrm{eq}} = \frac{U_{\mathrm{eq}}}{I_{\mathrm{eq}}}$$

Exercice

- 4.6.1. Une bobine est alimentée à partir d'un générateur dont la résistance interne est de 50 Ω. On a réglé l'amplitude du générateur à 5 V et sa fréquence à 1 kHz.

  a) Calculer l'inductance de la bobine si on a mesuré un courant de 35 mA.

  b) Quel est le déphasage de ce courant par rapport à la tension interne du générateur ?

  c) Tracer la tension interne du générateur, le courant et la tension aux bornes de la bobine.

Puissance moyenne d'un dipôle linéaire en régime sinusoïdal

- Considérons un courant et une tension sinusoïdaux déphasés de φ

$$i = I\sqrt{2}\sin(\omega t + \varphi_\mathrm{i}) \qquad u = U\sqrt{2}\sin(\omega t + \varphi_\mathrm{i} + \varphi)$$

$$p = u\,i = U\sqrt{2}\sin(\omega t + \varphi_\mathrm{i} + \varphi)\cdot I\sqrt{2}\sin(\omega t + \varphi_\mathrm{i}) =$$

$$= U\,I\left[\cos(\omega t + \varphi_\mathrm{i} + \varphi - \omega t - \varphi_\mathrm{i}) - \cos(\omega t + \varphi_\mathrm{i} + \varphi + \omega t + \varphi_\mathrm{i})\right] =$$

$$= UI\left[\cos\varphi - \cos(2\,\omega t + 2\,\varphi_\mathrm{i} + \varphi)\right]$$

en utilisant : $2\sin\alpha\sin\beta = \cos(\alpha - \beta) - \cos(\alpha + \beta)$

- Puissance active

$$P = (p)_\mathrm{av} = UI(\cos\varphi + 0) = UI\cos\varphi$$

car cos φ est une constante et la valeur moyenne de cos $2\omega t$ est nulle

- Cas particuliers de composants parfaits
  - Résistor : $P = UI\cos 0° = UI$
  - Bobine : $P = UI\cos 90° = 0$
  - Condensateur : $P = UI\cos(-90°) = 0$
- La bobine ni le condensateur parfaits ne consomment pas de puissance nette et donc ils ne dissipent pas de l'énergie

Puissance apparente

- La **puissance active**, c'est la puissance consommée nette
  - Mais attention : la puissance active d'un condensateur étant nulle, ça ne veut pas dire qu'on peut négliger son courant qui peut toutefois être important
- Le circuit doit être capable de supporter à la fois le courant I et la tension U, ce qui est exprimé par la **puissance apparente**

$$S = UI$$

  - Unité conventionnelle : voltampère [VA] (mathématiquement 1 VA = 1 W)
- C'est la puissance apparente qui décrit les capacités en tension et en courant nécessaires des composants d'un circuit
  - Générateurs, piles, accumulateurs…
  - Résistors, bobines, condensateurs…
  - Transformateurs, convertisseurs…
- La partie de la puissance apparente qui contribue au courant mais ne contribue pas à la consommation, c'est la **puissance réactive**
  - Elle représente la puissance qui circule entre les composants d'un circuit mais qui n'y est pas consommée

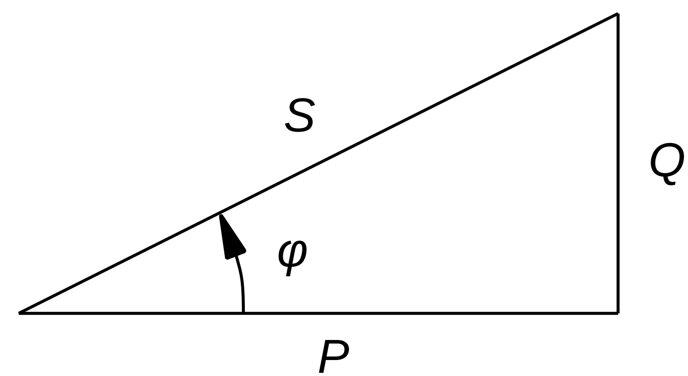
Puissance réactive

- Une certaine énergie peut être accumulée dans un condensateur ou une bobine à partir d'une source et ensuite retournée au circuit
  - Toutefois, le condensateur et la bobine restent des composants passifs, car cette énergie retournée n'est jamais supérieure à l'énergie accumulée
- La relation entre les trois valeurs de puissance est exprimée par le **triangle des puissances**
  - Loi de Pithagore :

$$S^2 = P^2 + Q^2$$

  - D'où :

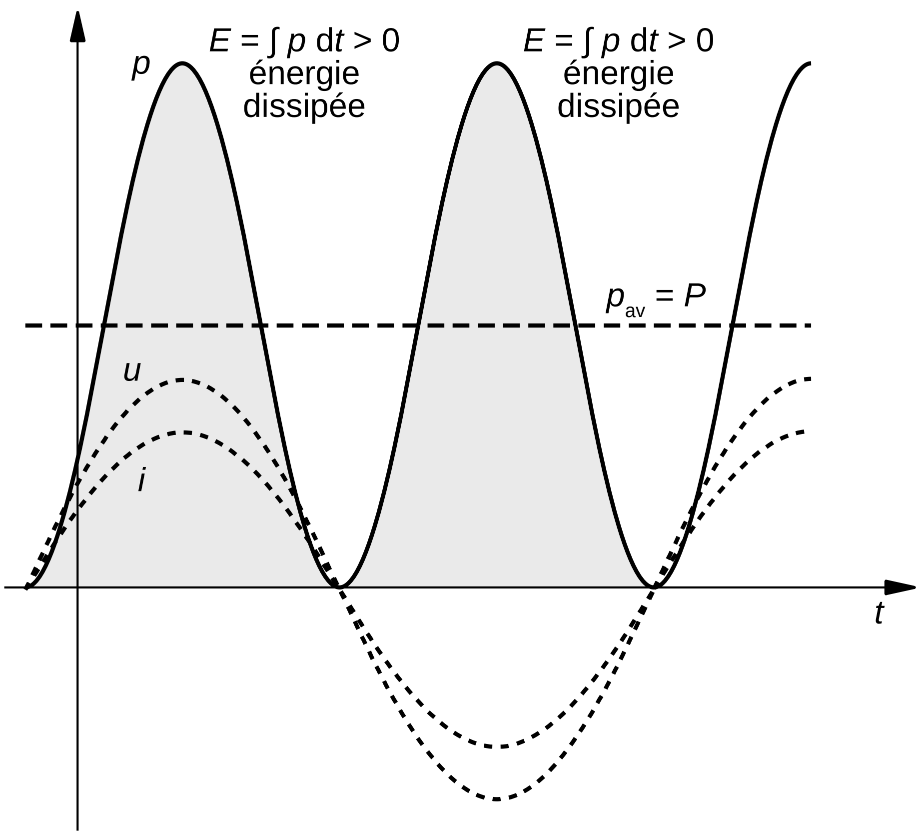
$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} = \sqrt{(UI)^2 - (UI)^2 \cos^2\varphi} =$$
$$= UI\sqrt{1 - \cos^2\varphi} = UI\sqrt{\sin^2\varphi} = UI\sin\varphi$$



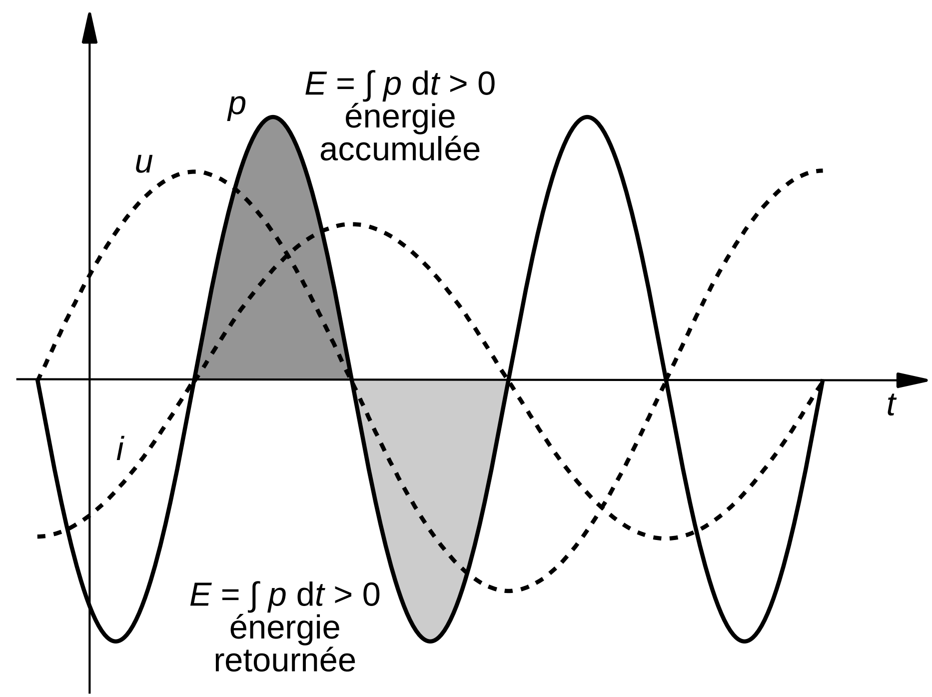
  - Unité : voltampère réactif [var] (mathématiquement 1 var = 1 W)
- Cas particuliers de composants parfaits
  - Résistor : $Q = UI\sin 0° = 0$
  - Bobine : $Q = UI\sin 90° = UI$
  - Condensateur : $Q = UI\sin(-90°) = -UI$

Analyse temporelle

- Résistor
  - À tout moment $p \geq 0$
  - Composante alternative de 2ω
  - Composante constante = P : c'est le terme $UI \cos \varphi$



- Bobine
  - La puissance instantanée est une forme d'onde alternative
  - Énergie est accumulée où $p > 0$ et la même est retournée où $p < 0$
  - Valeur moyenne = composante constante = P : nulles



Facteur de puissance

- Définition (applicable à tout dipôle en régime périodique)

$$\lambda = \frac{P}{S}$$

- Cas particulier d'un dipôle actif en régime sinusoïdal

$$\lambda = \frac{UI\cos\varphi}{UI} = \cos\varphi$$

  - Résistor parfait : $\lambda = \cos 0^\circ = 1$
  - Bobine ou condensateur parfaits : $\lambda = \cos \pm 90^\circ = 0$

- Dans un système d'alimentation à une tension périodique donnée, le facteur de puissance d'un récepteur détermine le courant nécessaire pour y délivrer une puissance active donnée

$$\lambda = \frac{P}{UI} \quad \Rightarrow \quad I = \frac{P}{U\lambda}$$

  - Le moindre courant circulera pour un récepteur purement résistif
  - Maximiser le facteur de puissance, c'est minimiser le coût de l'installation (générateur, câbles, transformateurs, convertisseurs...)

Exercice

- 4.7.1. Calculer la puissance active, la puissance réactive et la puissance apparente dans le circuit de l'exercice 4.6.1.