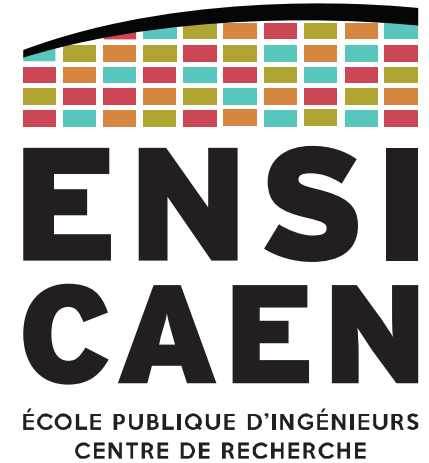


## Chapitre 2

# Les circuits triphasés



# GÉNÉRATION DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

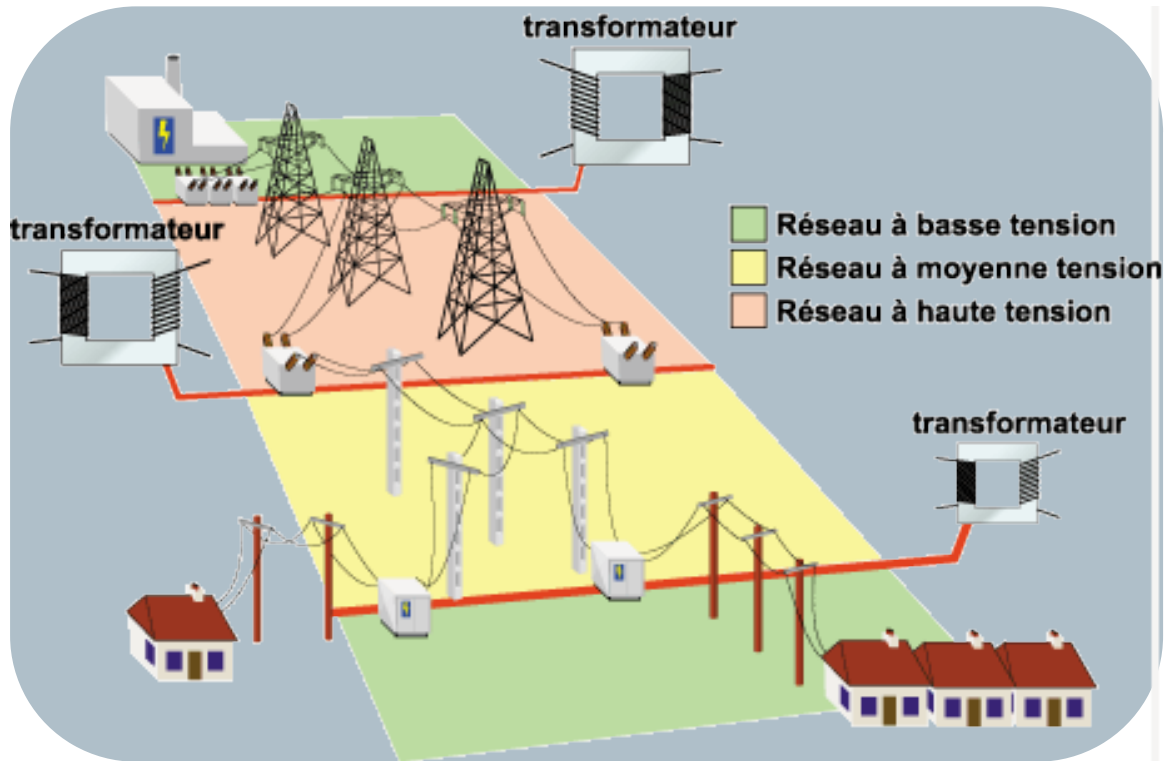


## L'électrotechnique au service de l'énergie électrique

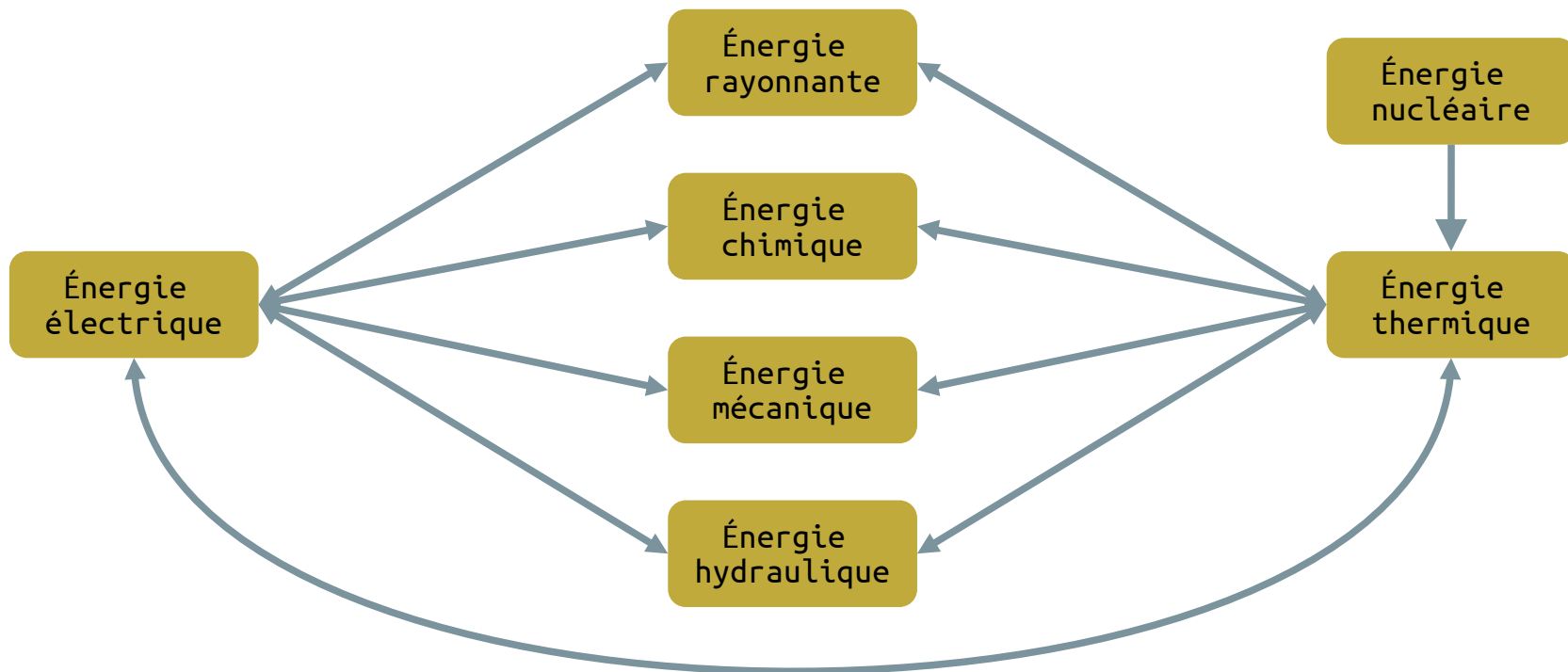
L'électrotechnique est un domaine de l'électricité qui englobe :

- La production
- Le transport
- La distribution
- La consommation

L'énergie est au cœur des systèmes rencontrés en électrotechnique.



L'énergie électrique est utilisée comme **moyen de transport**,  
mais très rarement comme moyen de stockage.



L'énergie (ou travail) mise en jeu par une machine évolue avec le temps.

À ce titre on préfère mesurer la quantité d'énergie induite par unité de temps, c'est ce qu'on appelle la **puissance** :

$$\text{Puissance (W)} \longleftarrow P = \frac{dW}{dt} \begin{array}{l} \longrightarrow \text{Travail (J)} \\ \longrightarrow \text{Temps (s)} \end{array}$$

Votre fournisseur d'électricité facture votre consommation d'électricité en kW·h, cela équivaut à facturer la quantité de puissance fournie pendant une durée connue.

En France (et plus largement en Europe), le réseau électrique est un système alternatif triphasé à 50 Hz.

Les niveaux de tensions vont de 230 V (domestique) à 420 kV (transport).



Mais dis-moi Jamy :

- Pourquoi alternatif et pas continu ?
- Pourquoi 230 V ?
- Pourquoi 50 Hz ?
- Pourquoi triphasé et pas monophasé ?

### Edison invente l'ampoule incandescente en 1878

- Le réseau électrique s'est ainsi développé en courant continu

### En 1884 Edison embauche Tesla, afin d'améliorer le réseau électrique de New-York.

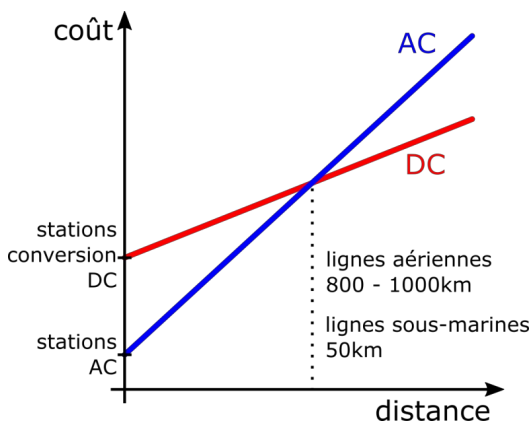
- Le réseau continu était peu fiable (pannes, accidents, incendies, ...)
- Le continu implique naturellement de grandes chutes de tensions (nécessité d'une centrale tous les 2-3 km)
- L'incapacité à l'époque de modifier le niveau de tension DC imposait d'utiliser en parallèle plusieurs réseaux de distribution selon les tensions utilisées par les clients (particuliers, éclairage, industrie, ...).

Tesla proposa alors à Edison de basculer au courant alternatif, arguant que ces défauts seraient annulés. Tesla avait déjà mis au point une machine à induction.

Edison refusa, et la "guerre des courants" débuta ... **AC/DC**

### Alternatif – AC $\sim$

- Transformateur : conversion du niveau de tension avec un bon rendement ( $> 90 \%$ ).
- Effet capacitifs néfastes sur longues distances
- Le courant alternatif s'annule deux fois par période : possibilité d'ouvrir facilement le circuit électrique.



### Continu – DC $\equiv$

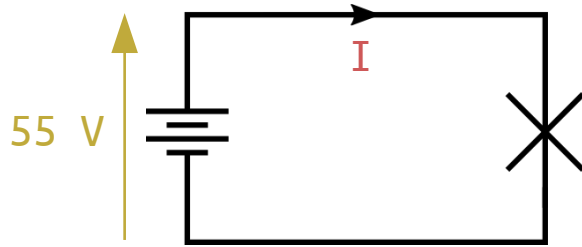
- Il existe désormais des convertisseurs permettant de changer le niveau de tension DC.
- Chutes de tension sur de longues distances
- Utilisé aujourd'hui sur de très longues distances ou pour connecter deux réseaux asynchrones

- DC**
- Convertisseurs de puissance aux deux extrémités
  - 2 conducteurs

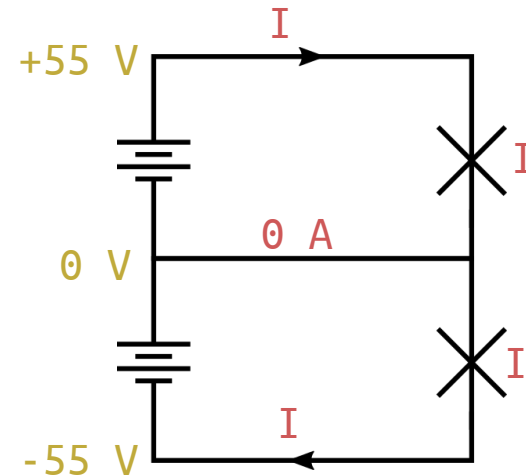
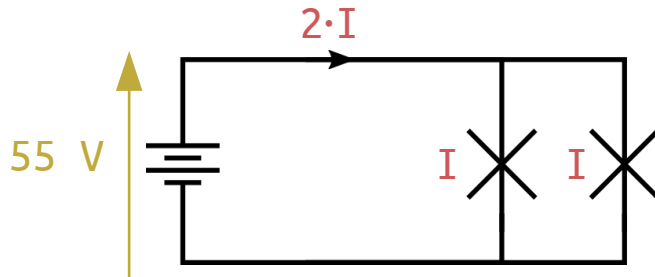
- AC**
- Un seul générateur
  - 3 conducteurs



Les lampes à arc de carbone (1844, Foucault) fonctionnaient en 55 V DC.

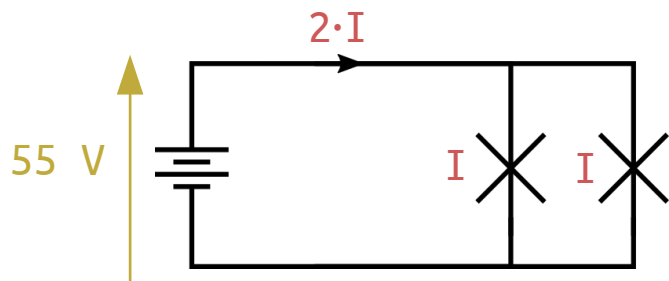


Pour alimenter deux lampes, deux options :



La mise en série des sources et des charges est plus intéressante car elle dissipe moins de puissance dans les conducteurs tout en nécessitant moins de cuivre.

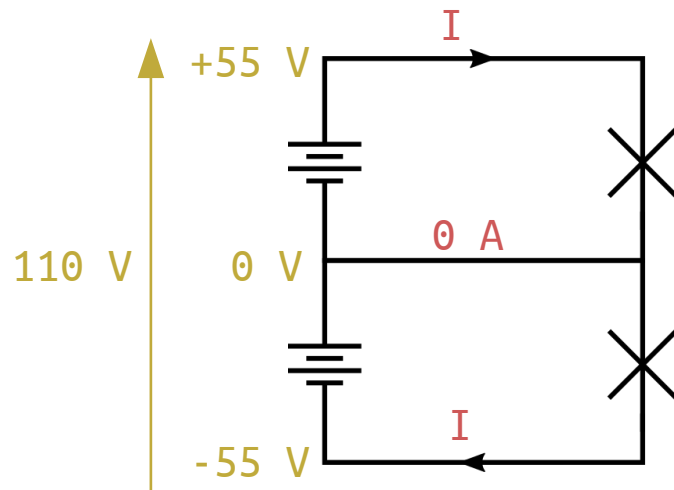
Dans la configuration parallèle, les câbles doivent avoir une section deux fois plus grande (donc  $R/2$ ) :



Puissance par effet Joule dans les conducteurs :

$$P_{\text{parallele}} = (R/2) \times (2 \cdot I)^2 = 2 \cdot R \cdot I^2$$

Dans la configuration série, il faut deux sources :



$$P_{\text{serie}} = R \cdot I^2$$

Le niveau de tension pour usage domestique est toujours de 110 V dans certains pays, mais il est passé à 220 V et maintenant 230 V en Europe.

Mais attention, les tensions évoquées dans les diapos précédentes sont des tensions continues, alors que les tensions dont on vient de parler sont des tensions alternatives !

Les valeurs données en alternatif correspondent alors aux **valeurs efficaces** des tensions (et non leur amplitude).

Rappel en sinusoïdal :  $V_{\text{crete}} = V \sqrt{2}$

Pour le réseau européen, la tension efficace est  $V = 230 \text{ V}$  et l'amplitude de la tension est  $V_{\text{crete}} = 325 \text{ V}$ .

L'élévation de la tension afin de limiter les pertes et le cuivre est également valable pour le transport de l'électricité à très haute tension.

|                                   |                    |                                                                                                  |
|-----------------------------------|--------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Production</b>                 | 10 kV<br>à 25 kV   | Niveau limité par l'isolation électrique dans les générateurs                                    |
| <b>Transport</b>                  | 110 kV<br>à 420 kV | On peut trouver plus élevé (par ex 1200 kV par endroits en Russie)                               |
| <b>Distribution</b>               | 10 kV<br>à 72,5 kV | Niveau limité par l'isolation électrique dans les générateurs                                    |
| <b>Consommateurs industriels</b>  | 10 kV<br>à 150 kV  | Sidérurgie, automobile, chimie lourde, papier, ...<br>SNCF plus gros consommateur (TGV en 25 kV) |
| <b>Consommateurs particuliers</b> | 230 V<br>et 400 V  | 400 V triphasé (pompes à chaleur, fours, machines<br>outils, lave-linges)                        |

Le choix de la fréquence a évolué au cours du temps. Elle est fixée à 50 Hz en Europe.

Si fréquence trop basse :

- Scintillement de la lumière

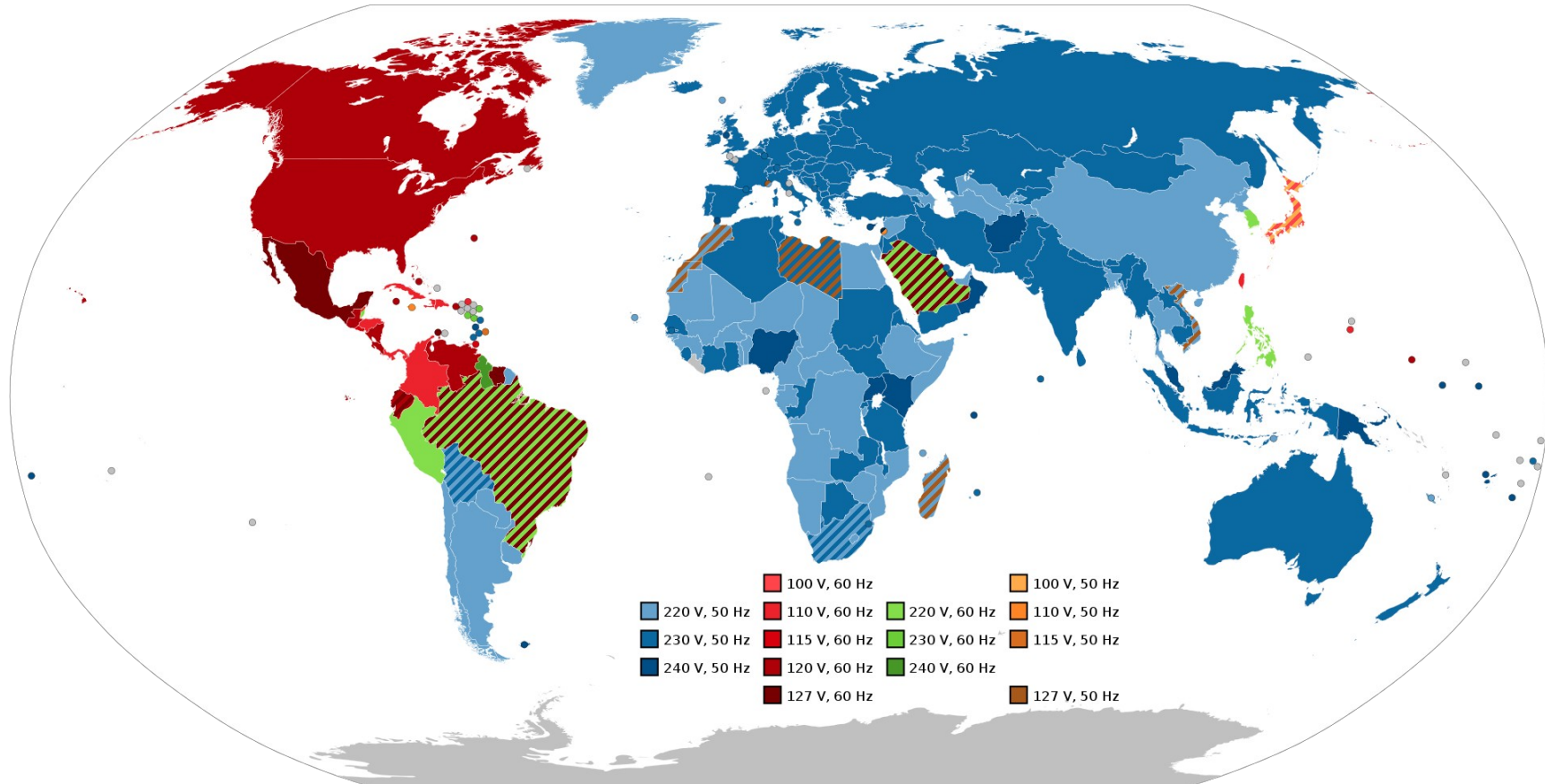
Si fréquence trop élevée :

- Pertes par hystérésis dans les transformateurs ( $\propto f$ )
- Pertes par courants de Foucault ( $\propto f^2$ )
- Réactance  $X = L \cdot \omega$  , donc chute de tension dans les lignes

À même puissance, augmenter la fréquence permet de réduire l'encombrement des machines électriques et des transformateurs.

D'ailleurs les avions, paquebots et plateformes pétrolières ont un réseau à une fréquence de 400 Hz.





## Monophasé vs Triphasé

### Puissance délivrée en **monophasé**

$$v(t) = V \sqrt{2} \cos(\omega t)$$

$$i(t) = I \sqrt{2} \cos(\omega t - \varphi)$$

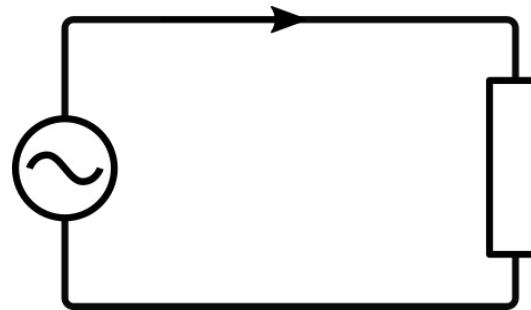
### Puissance instantannée

$$p(t) = v(t) \times i(t)$$

$$p(t) = V I [ \cos(\varphi) + \cos(2\omega t - \varphi) ]$$

### Puissance moyenne

$$P_{mono} = V I \cos(\varphi)$$



Monophasé = 2 câbles

← Remarque : la puissance instantannée comporte un terme fluctuant à la fréquence double. Cela peut se traduire par des ondulations de couple ou des scintillements.

### Puissance délivrée en **triphasé**

$$v_k(t) = V \sqrt{2} \cos\left(\omega t - k \frac{2\pi}{3}\right)$$

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

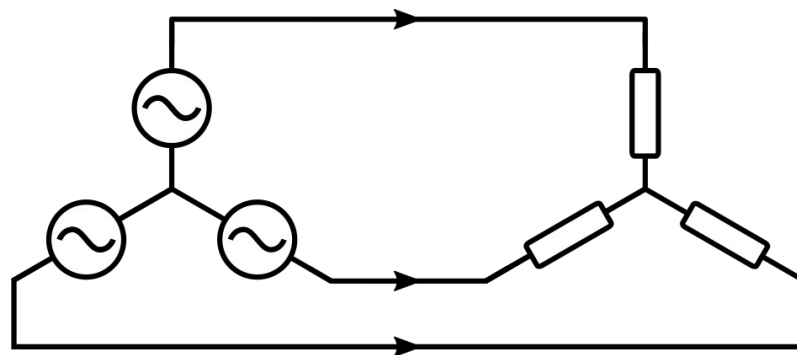
### Puissance instantannée

$$p(t) = 3 \times v_k(t) \times i_k(t)$$

$$p(t) = 3 V I \cos(\varphi)$$

### Puissance moyenne

$$P_{tri} = 3 V I \cos(\varphi)$$



Triphasé = 3 câbles

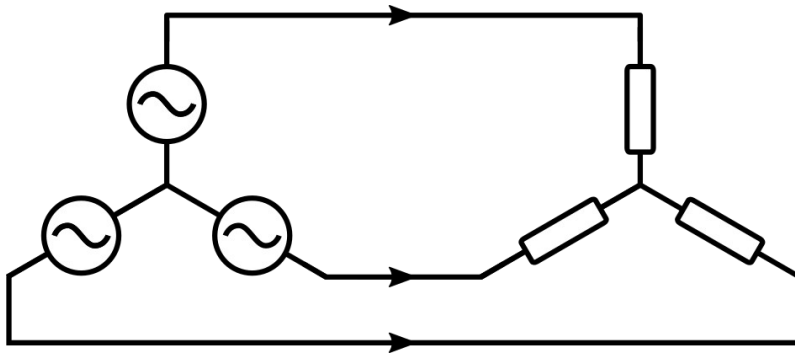
← Remarque : pour un système triphasé équilibré, la puissance instantannée est constante (généralisable à n phases).



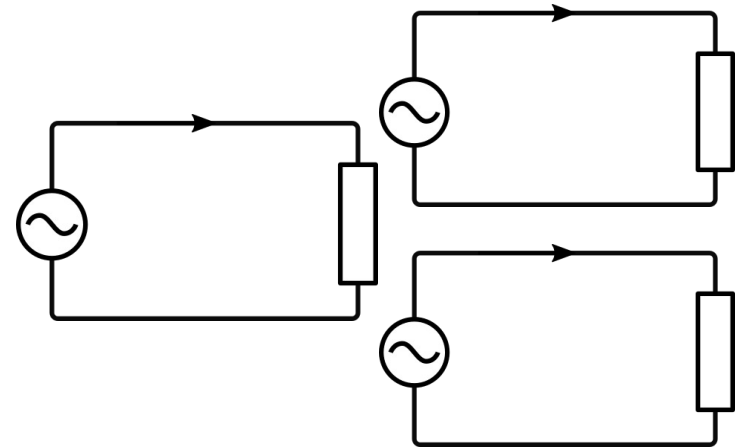
## Monophasé vs Triphasé

Un système triphasé permet de transporter la même puissance que 3 systèmes monophasés, tout en utilisant deux fois moins de conducteurs.

$$P_{tri} = 3 V I \cos(\varphi) = 3 P_{mono}$$



Triphasé = 3 câbles



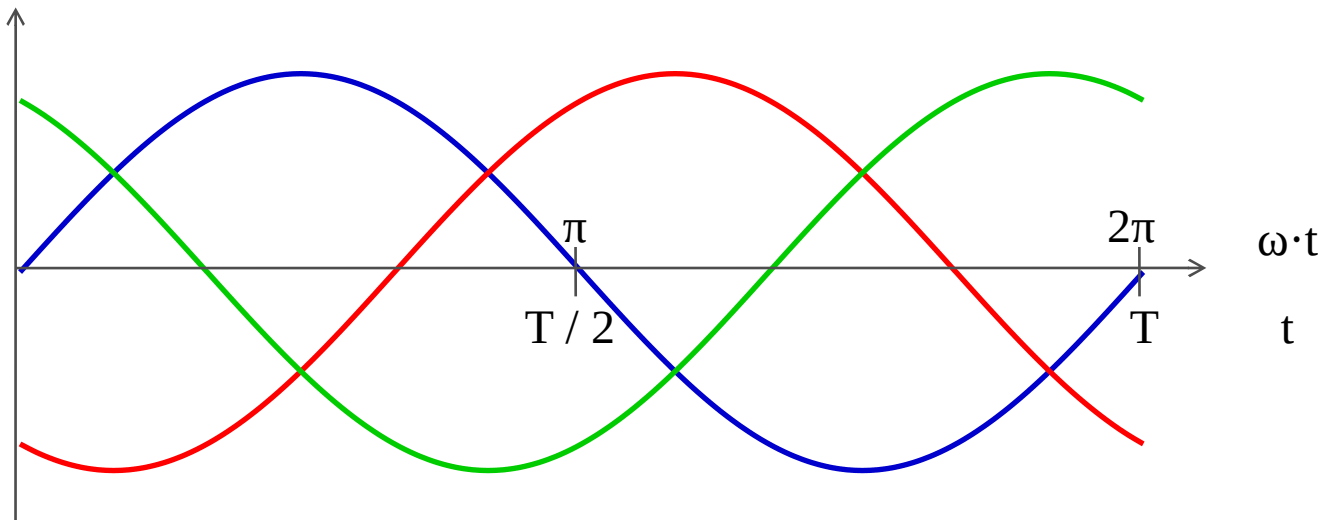
Monophasé = 3 x 2 câbles

Pour le **système triphasé** est constitué de trois tensions définies par :

$$v_1(t) = V\sqrt{2} \sin(\omega t)$$

$$v_2(t) = V\sqrt{2} \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3})$$

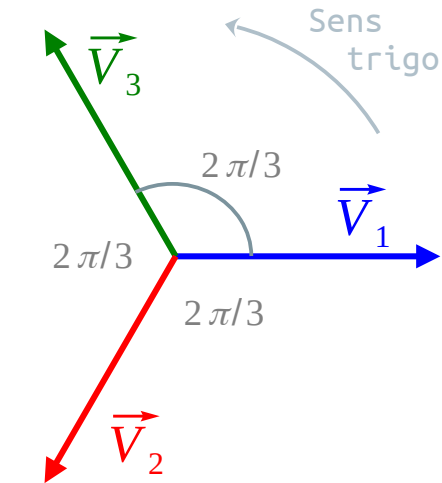
$$v_3(t) = V\sqrt{2} \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3})$$



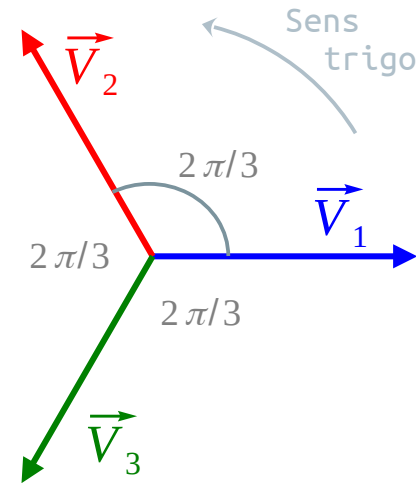
Ces trois signaux ont la même amplitude, même pulsation mais sont déphasés de  $2\pi/3$ .

En Europe :  $V = 230 \text{ V} \pm 10 \%$  (pour l'électricité domestique) et  $f = 50 \text{ Hz}$ .

Les systèmes triphasés sont étudiés à l'aide de la représentation vectorielle.



Système direct

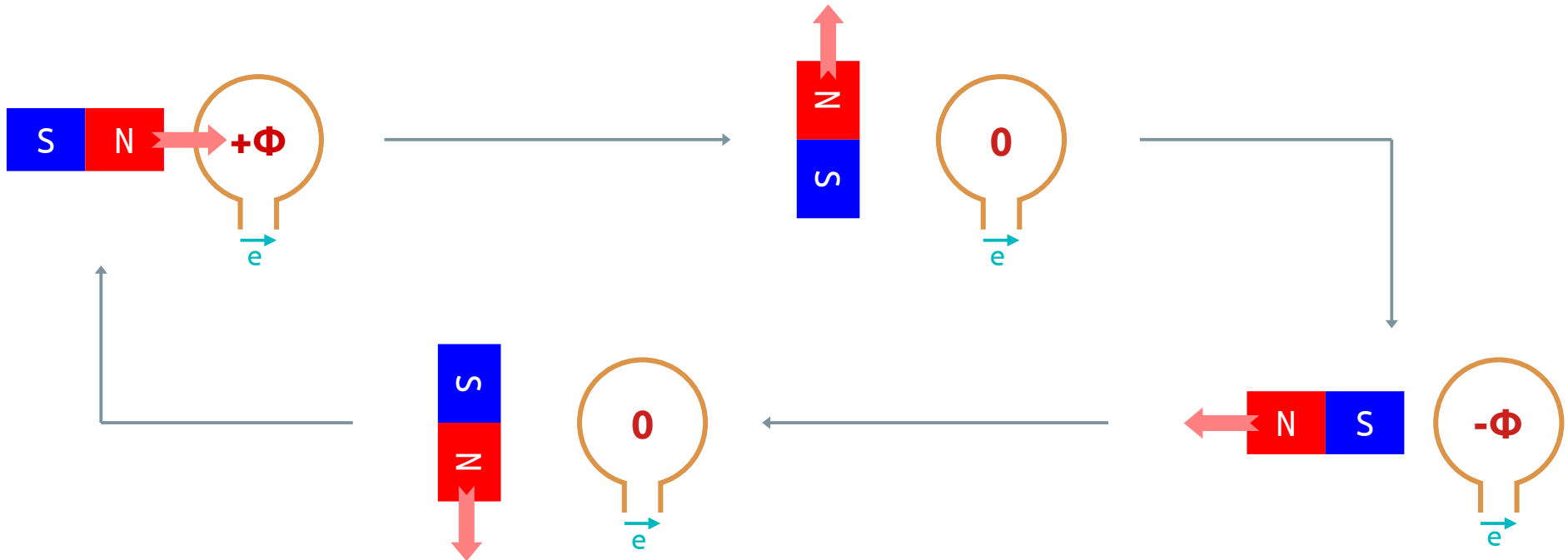


Système indirect

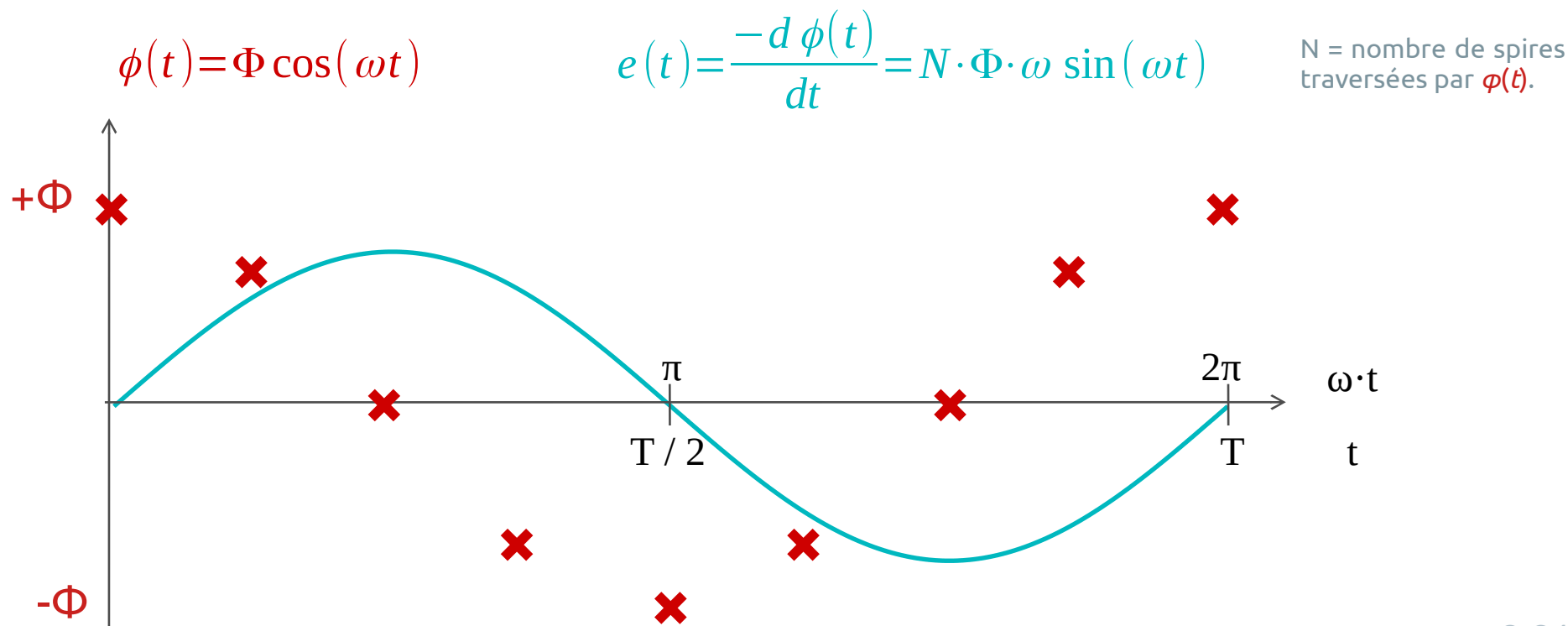
Dans tous les cas, la somme des tensions est nulle :  $\vec{V}_1 + \vec{V}_2 + \vec{V}_3 = 0$

L'électricité est généralement obtenue à partir d'énergie mécanique, avec ce qu'on appelle un alternateur.

Une spire placée devant un aimant tournant à une vitesse  $\omega$  est traversée par un flux  $\phi$ .

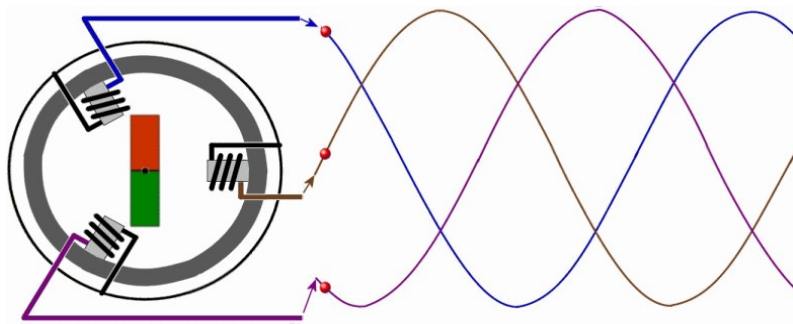


On s'arrange pour que le flux embrassé par la spire soit de forme sinusoïdale, on obtient alors une **tension sinusoïdale**.



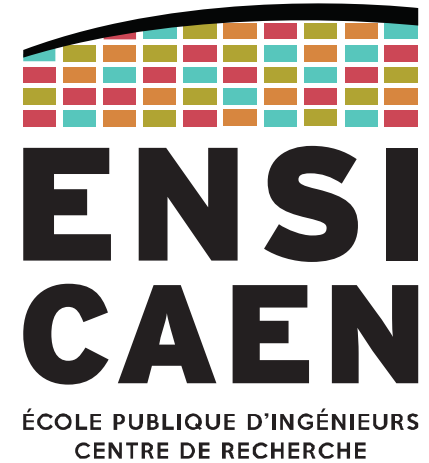
Les alternateurs des centrales électriques sont triphasés :

- À puissance égale, l'alternateur triphasé coûte moins cher
- La distribution sous forme triphasée occasionne moins de pertes



Rotor de l'alternateur du réacteur n°1 de Flamanville.  
Convoi de 67 m de long, 3 m de large, 450 tonnes pour maintenance.

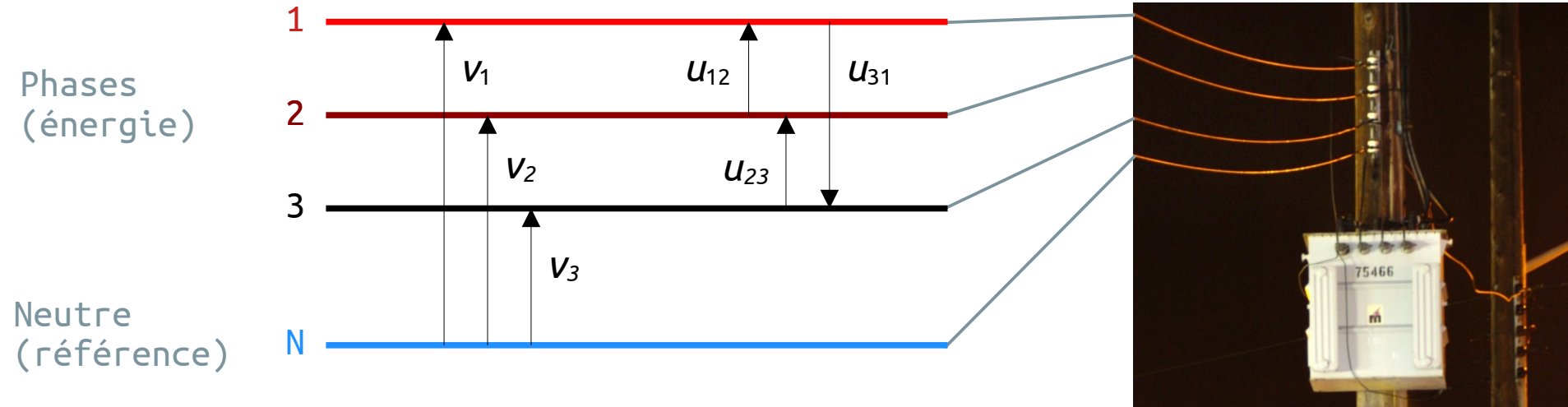
# DISTRIBUTION DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE



## Ligne électrique

L'énergie électrique est transportée dans des câbles qui constituent la ligne.

- $v_1$ ,  $v_2$  et  $v_3$  sont les tensions simples
- $u_{12}$ ,  $u_{23}$  et  $u_{31}$  sont les tensions composées

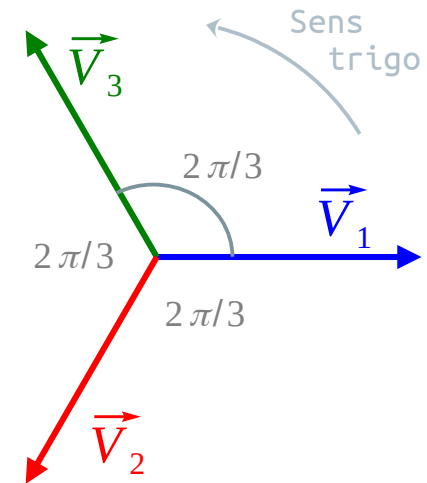
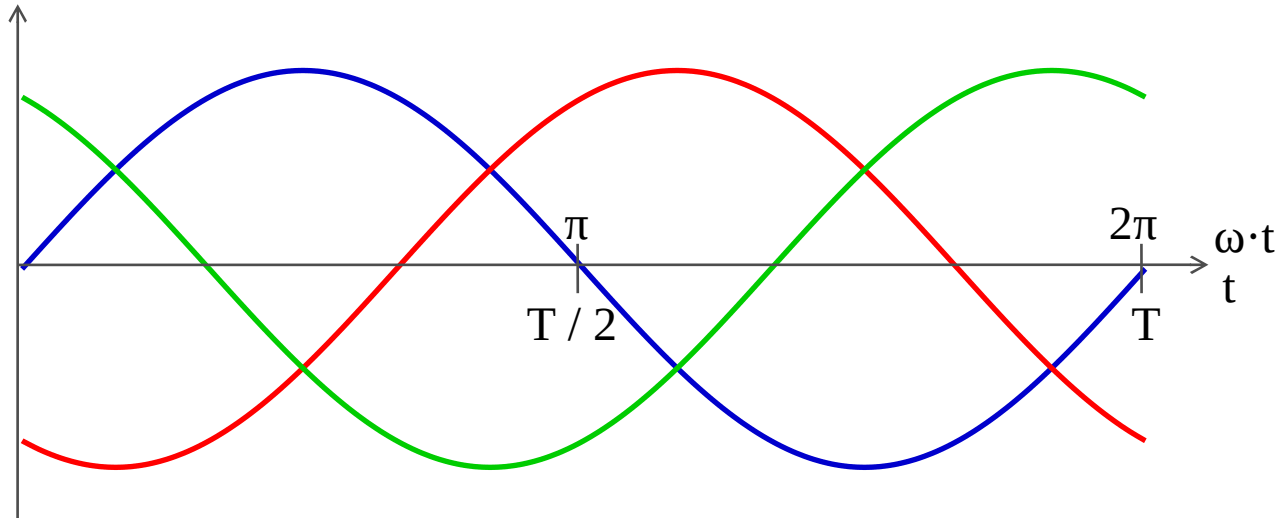




## Tensions simples

Les trois tensions simples ont la même valeur efficace  $V$  et la même fréquence :

→  $v_1$ ,  $v_2$  et  $v_3$  forment un système triphasé équilibré.



La somme vectorielle des tensions est nulle :  $\vec{V}_1 + \vec{V}_2 + \vec{V}_3 = 0$

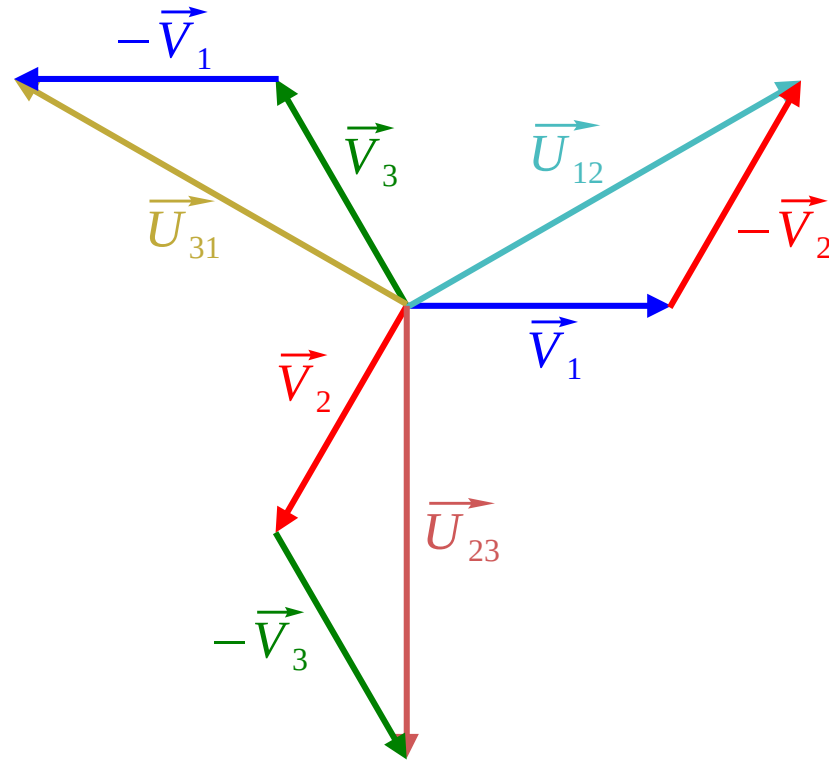
Les trois tensions composées ont la même valeur efficace  $U$  et la même fréquence :

→  $u_{12}$ ,  $u_{23}$  et  $u_{31}$  forment un système triphasé équilibré.

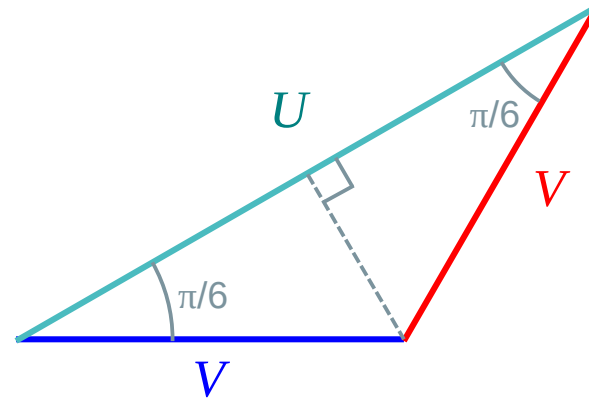
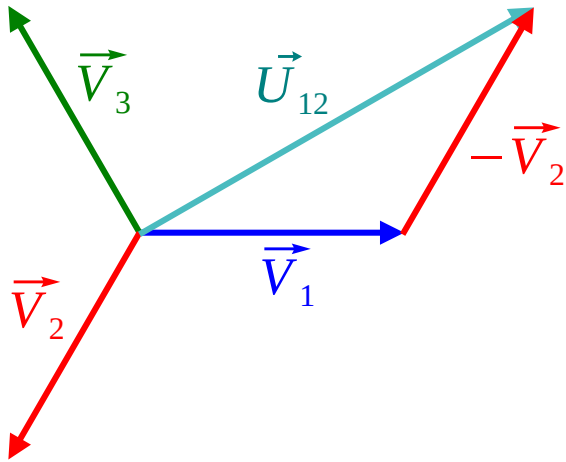
$$\vec{U}_{12} = \vec{V}_1 - \vec{V}_2$$

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

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



## Relations entre tensions simples et composées



$$U = 2 \times V \cos\left(\frac{\pi}{6}\right) = 2 \times V \frac{\sqrt{3}}{2} \rightarrow U = V \sqrt{3}$$

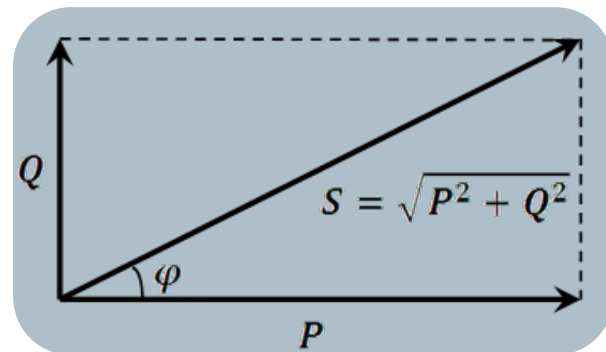


## Puissance délivrée dans une charge complexe

Lorsque la charge est complexe (résistive + inductive ou capacitive), le courant de la charge n'est plus en phase avec la tension à ses bornes.

Soient  $v(t) = V\sqrt{2}\cos(\omega t)$  et  $i(t) = I\sqrt{2}\cos(\omega t + \varphi)$ , on note :

- La puissance active  $P = V \cdot I \cos(\varphi)$  en W
- La puissance réactive  $Q = V \cdot I \sin(\varphi)$  en VAR
- La puissance apparente  $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$  en VA
- Le facteur de puissance  $f_p = P / S$



Note 1 : équations uniquement valables en régime sinusoïdal de tensions et de courants.

Note 2 : W = Watt ; VAR = Volt-Ampère Réactif ; VA = Volt-Ampère

## Puissance délivrée dans une charge complexe

Comprendre les puissances en jeu.

La **puissance active  $P$  (W)** est la **puissance utile**, soit la puissance réellement consommée par la charge).

Il s'agit de la valeur moyenne de la puissance instantanée  $p(t)$ .

La **puissance réactive  $Q$  (VAR)** est le résultat d'un **échange entre la source et la charge** → ce n'est pas de la puissance perdue !

La **puissance apparente  $S$  (VA)** est une **puissance dimensionnante** : c'est celle qui impose la section des câbles de la ligne.



### Théorème de Boucherot

Dans une installation, la puissance active totale consommée est égale la somme des puissances actives consommées par chaque élément :

$$P = \sum P_i$$

Ceci est également valable pour la puissance réactive totale :

$$Q = \sum Q_i$$

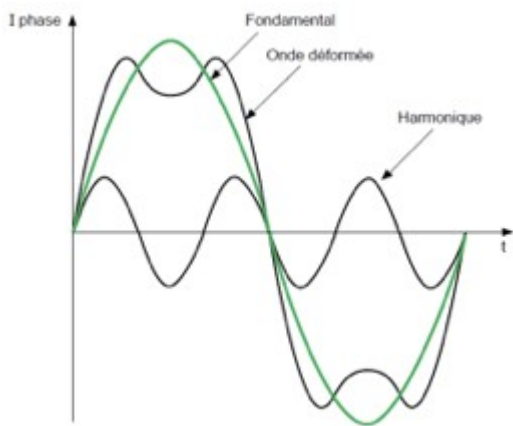
Attention, cela n'est pas valable pour la puissance apparente !

→ Pour calculer  $S_{\text{totale}}$ , il faut impérativement passer par  $P_{\text{totale}}$  et  $Q_{\text{totale}}$ .

## Puissance déformante

Lorsque la charge est non linéaire, elle déforme le courant consommé. On sort du régime sinusoïdal **de courant** puisque celui-ci comporte alors des harmoniques.

Les équations précédentes se retrouvent alors modifiées, et on définit alors la notion de puissance déformante.



$$P = V \cdot I_1 \cos(\varphi_1)$$

$$Q = V \cdot I_1 \sin(\varphi_1)$$

$$D = V \cdot \sum_{k=2}^{\infty} I_k \sin(\varphi_k)$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}$$

$$f_p = P / S$$

Les harmoniques n'impactent pas P

Les harmoniques n'impactent pas Q

La puissance déformante D (en VAD)

Les harmoniques impactent S

La puissance déformante dégrade  $f_p$

Hypothèse : on reste en régime sinusoïdal de tension (mais pas de courant)



## Puissance déformante

Les harmoniques de courant qui remontent le réseau électrique ont des effets néfastes sur les appareils :

- Erreur de relevé sur les compteurs à induction
- Perturbation du récepteur heures creuses / heures pleines et de terminaux CPL (Courant Porteur en Ligne)
- Vibrations, bruits dans les appareils électromagnétiques (transformateurs, moteurs)
- Échauffement plus élevé des câbles, condensateurs

Pour limiter ces perturbations, les fabricants d'appareils électriques sont soumis aux normes du CEI 61000.

### Ci-contre, extrait de la norme CEI 61000-3-2

Compatibilité électromagnétique (CEM) –

Partie 3-2: Limites – Limites pour les émissions de courant harmonique (courant appelé par les appareils  $\leq 16$  A par phase)

Note : Classe A = appareils triphasés équilibrés (notamment)

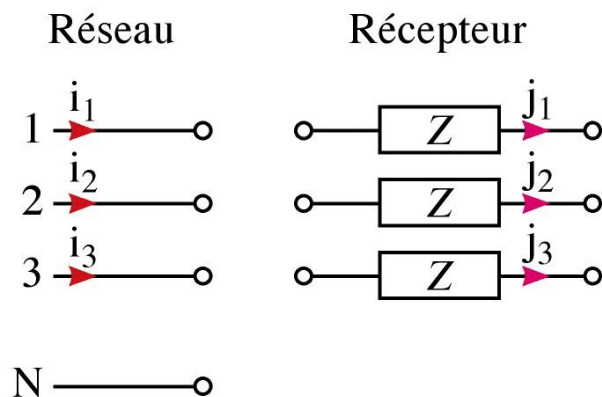
Tableau 1 – Limites pour les appareils de classe A

| Rang harmonique<br>n | Courant harmonique<br>maximal autorisé<br>A |
|----------------------|---------------------------------------------|
| Harmoniques impairs  |                                             |
| 3                    | 2,30                                        |
| 5                    | 1,14                                        |
| 7                    | 0,77                                        |
| 9                    | 0,40                                        |
| 11                   | 0,33                                        |
| 13                   | 0,21                                        |
| $15 \leq n \leq 39$  | $0,15 \frac{15}{n}$                         |
| Harmoniques pairs    |                                             |
| 2                    | 1,08                                        |
| 4                    | 0,43                                        |
| 6                    | 0,30                                        |
| $8 \leq n \leq 40$   | $0,23 \frac{8}{n}$                          |

## Charge triphasée équilibrée

La ligne triphasée est utilisée pour alimenter une **charge (ou récepteur)**, qu'on considérera également comme **triphasée et équilibrée**.

Nous verrons plus loin qu'il existe plusieurs manières de coupler le réseau et la charge, il est donc pertinent de distinguer **courant de ligne** et **courant simple**.

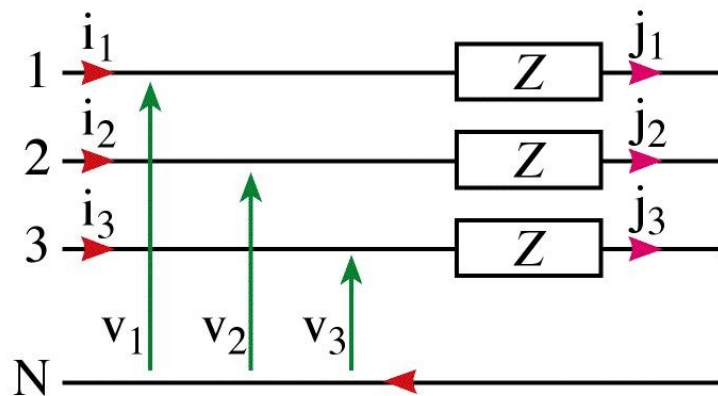
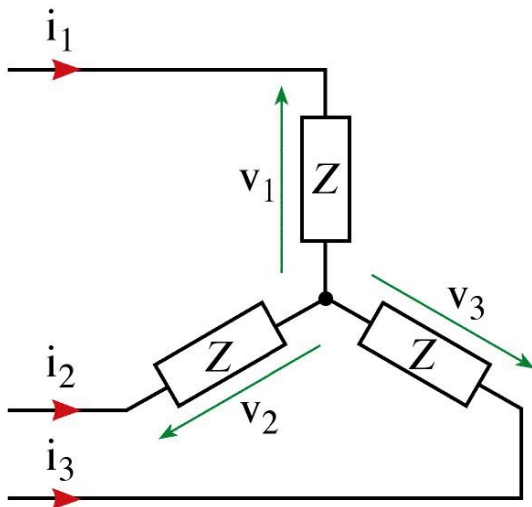


- Les courants de ligne  $i$  circulent dans les câbles de la ligne
- Les courants simples  $j$  circulent dans les impédances de la charge

## Couplage en étoile (Y)

Dans un couplage en étoile (symbole Y),

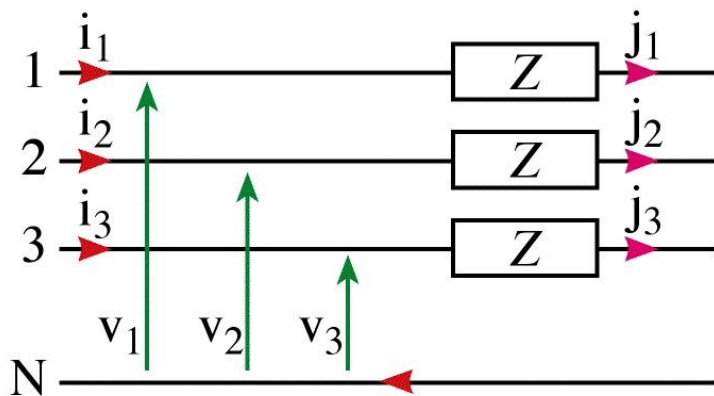
- Chaque impédance est parcourue par un courant de ligne :  $i_1 = j_1$  ;  $i_2 = j_2$  ;  $i_3 = j_3$
- Chaque impédance voit à ses bornes une tension simple :  $v_{Z1} = v_1$  ;  $v_{Z2} = v_2$  ;  $v_{Z3} = v_3$
- Le fil de neutre n'est pas nécessaire car :  $i_N = i_1 + i_2 + i_3 = (v_1 + v_2 + v_3) / Z = 0$



## Couplage en étoile (Y)

### Bilan des puissances (couplage étoile)

- Puissance active dans une phase  $V \cdot I \cos(\varphi)$
- Puissance active totale  $P = 3 V \cdot I \cos(\varphi) = \sqrt{3} U \cdot I \cos(\varphi)$
- Puissance réactive totale  $Q = 3 V \cdot I \sin(\varphi) = \sqrt{3} U \cdot I \sin(\varphi)$
- Puissance apparente totale  $S = \sqrt{P^2 + Q^2} = 3 V \cdot I = \sqrt{3} U \cdot I$
- Facteur de puissance  $f_p = P / S = \cos(\varphi)$

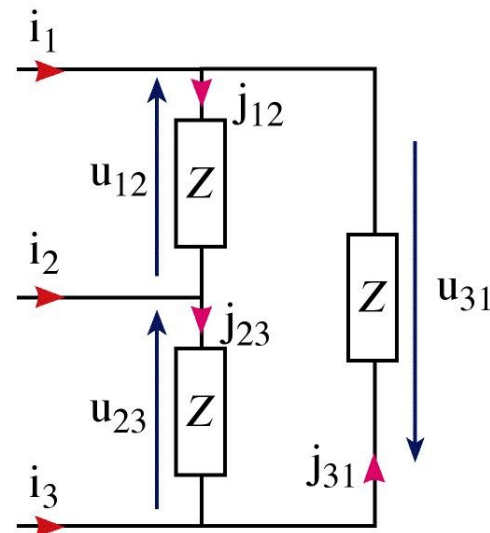
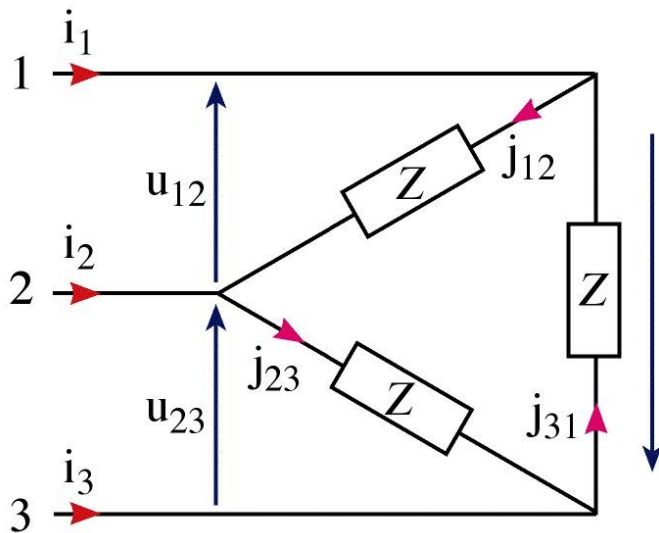


## Couplage en triangle ( $\Delta$ )

Dans un couplage en triangle (symbole  $\Delta$ ),

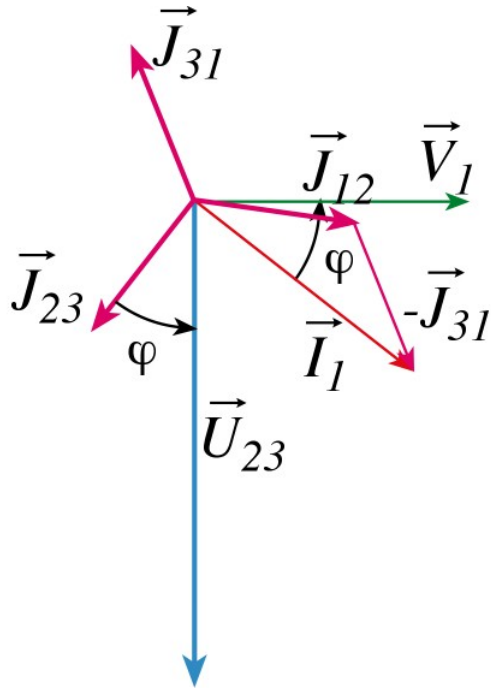
- Chaque impédance est parcourue par un courant composé :  $i_1 = j_{12} - j_{31}$  ; ... avec  $I = ?$
- Chaque impédance voit à ses bornes une tension composée :  $v_{Z1} = u_{12}$  ;  $v_{Z2} = u_{23}$  ;  $v_{Z3} = u_{31}$
- Il n'y a pas de fil de neutre !  

$$i_1 + i_2 + i_3 = 0 \quad ; \quad j_1 + j_2 + j_3 = 0$$

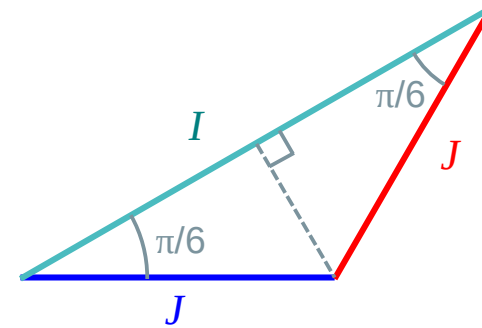


## Couplage en triangle ( $\Delta$ )

### Relation entre I et J (couplage triangle)



Chaque impédance est soumise à une tension U et parcourue par un courant J.



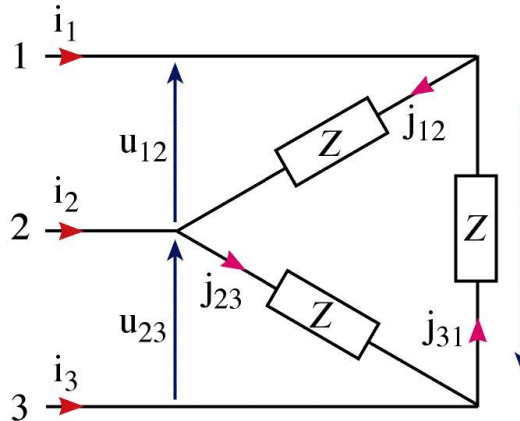
On trouve que la relation entre I et J en couplage triangle est similaire à celle entre tension simple et tension composée :

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

## Couplage en triangle ( $\Delta$ )

### Bilan des puissances (couplage triangle)

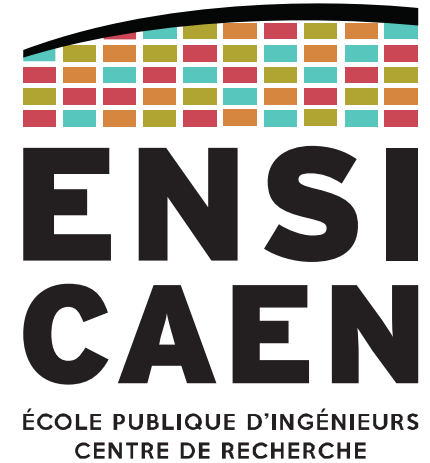
- Puissance active dans une phase  $U \cdot J \cos(\varphi)$
- Puissance active totale  $P = 3 U \cdot J \cos(\varphi) = \sqrt{3} U \cdot I \cos(\varphi)$
- Puissance réactive totale  $Q = 3 U \cdot J \sin(\varphi) = \sqrt{3} U \cdot I \sin(\varphi)$
- Puissance apparente totale  $S = \sqrt{P^2 + Q^2} = 3 U \cdot J = \sqrt{3} U \cdot I$
- Facteur de puissance  $f_p = P / S = \cos(\varphi)$





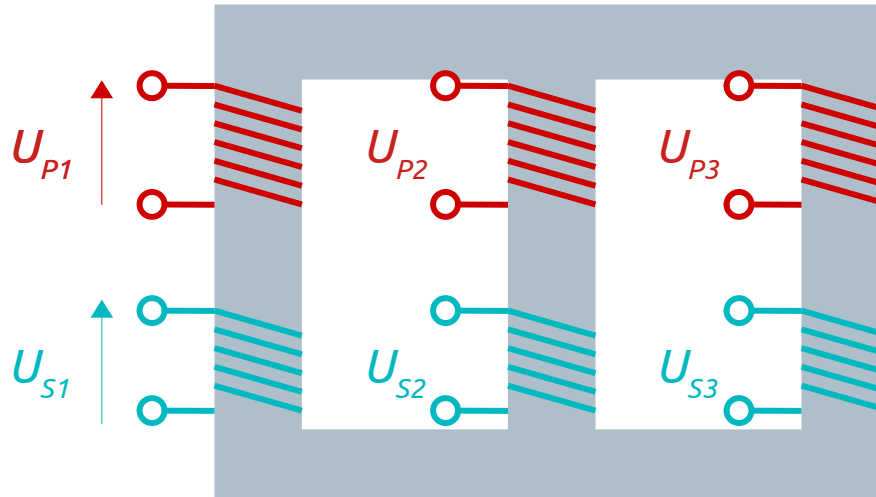


# LE TRANSFORMATEUR TRIPHASÉ



## Constitution

Le transformateur triphasé est équivalent à trois transformateurs monophasés. Le premier indice indique le côté et le second indique le numéro de phase.



← 3 enroulements primaires

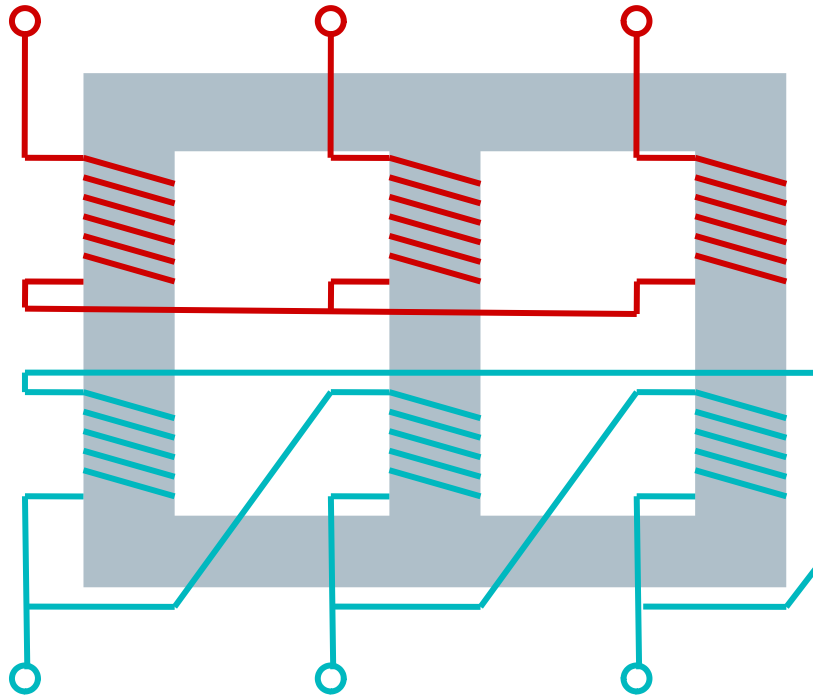
← 3 enroulements secondaires

Le rapport de transformation pour chaque phase vaut :

$$m = \frac{U_S}{U_P} = \frac{I_P}{I_S} = \frac{N_S}{N_P}$$

## Couplages

Les trois enroulements (du primaire comme du secondaire) peuvent être couplés de trois manières : étoile, triangle et zigzag.

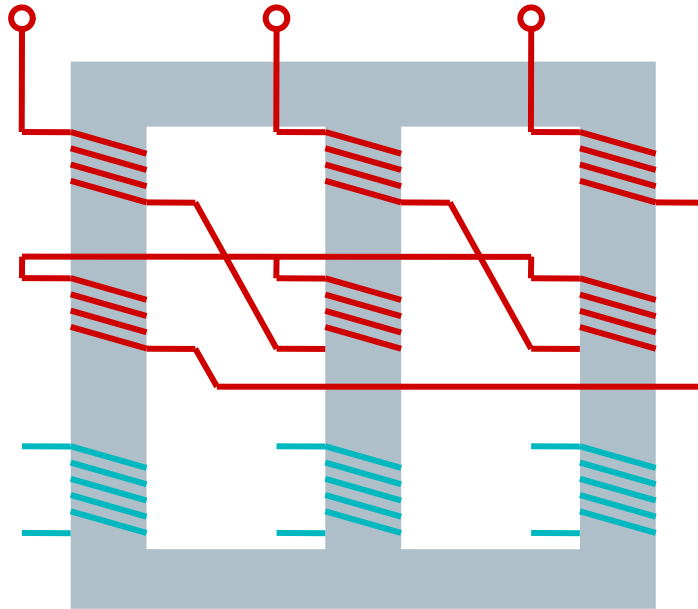


← Couplage étoile  
au primaire

← Couplage triangle  
au secondaire

## Couplage zigzag

Le couplage zigzag est obtenu en divisant les trois enroulements en six. Chaque demi-enroulement est mis en série avec un autre du noyau suivant.



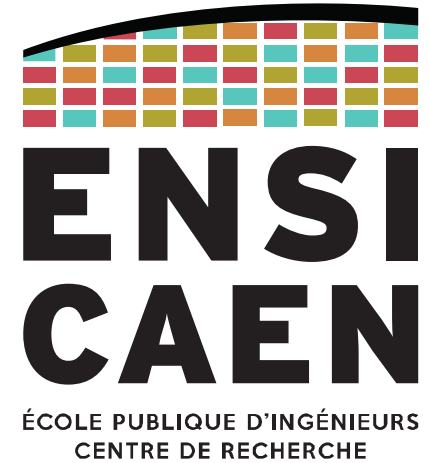
← Couplage zigzag  
au primaire

Le couplage zigzag permet de répartir le déséquilibre de charge sur les trois noyaux.

## Choix du couplage

- Il faut éviter d'avoir le même couplage au primaire et au secondaire
  - Pour ne pas transmettre le déséquilibre d'un côté à un autre
- Du côté haute tension, un neutre mis à la terre est intéressant
  - Sécurité
- Du côté basse tension, la présence d'un neutre permet de disposer de deux niveaux de tensions
  - En choisissant soit les tensions simples, soit les tensions composées
- On voit alors apparaître l'intérêt des couplages ZY et YZ

# RELÈVEMENT DU FACTEUR DE PUISSANCE



## Rappels

En régime sinusoïdal :  $f_p = \frac{P}{S} = \frac{V I \cos(\varphi)}{V I} = \cos(\varphi)$

Ceci signifie que plus le facteur de puissance est mauvais (plus il s'éloigne de 1), plus l'énergie réactive prend une part importante dans l'énergie apparente (et donc dans le dimensionnement des câbles).

Les sociétés de production d'énergie électrique imposent donc aux usagers un facteur de puissance  $f_p > 0,93$  sous peine de leur facturer l'énergie réactive.

NB : ceci est valable pour les usagers raccordés en HT, pas en BT.

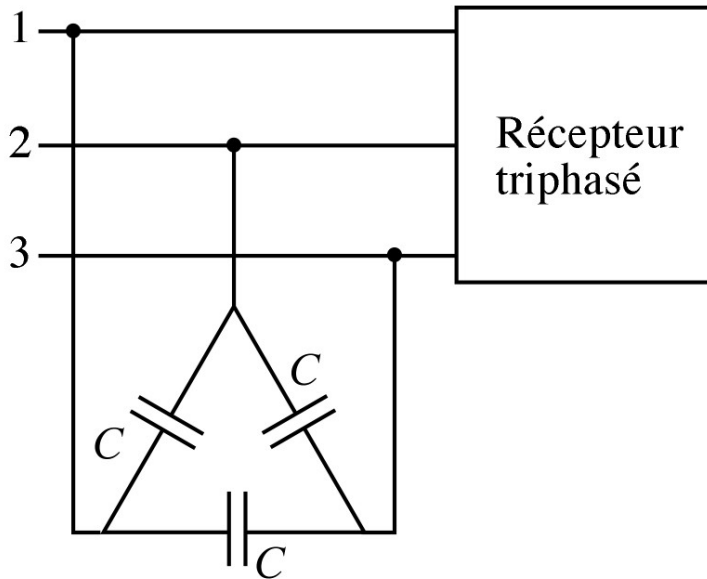
Le facteur de puissance est très souvent dégradé par des charges inductives (transformateurs, machines électriques).

Pour relever celui-ci, il faut compenser les charges inductives en ajoutant des condensateurs en parallèle.

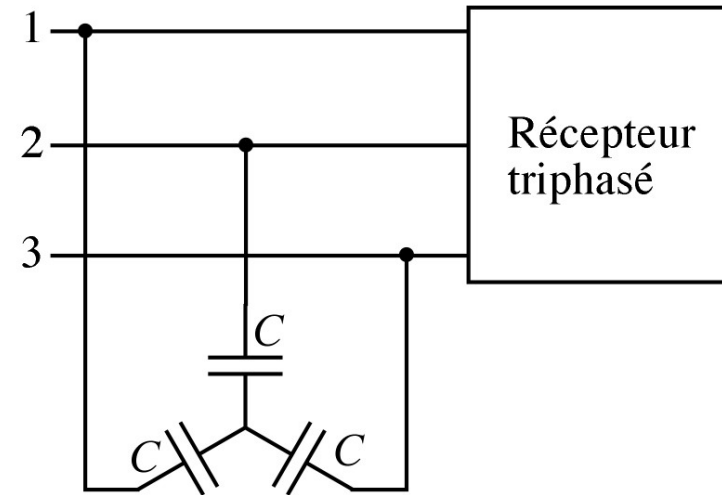
$$Q_C = -V^2 C \omega$$

## Batteries de condensateurs

Le couplage triangle est préférable car, pour une même puissance réactive fournie, il nécessite des capacités trois fois plus faibles qu'en couplage étoile.



$$Q_C = -3 U^2 C \omega$$



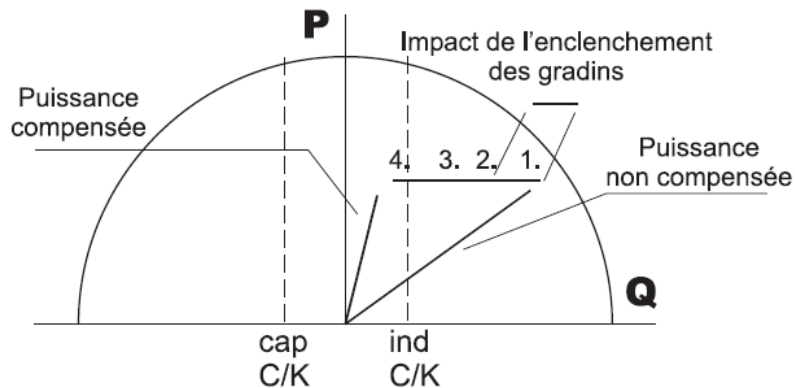
$$Q_C = -3 V^2 C \omega$$



## Régulateur de puissance réactive

Le régulateur de puissance réactive calcule la puissance réactive nécessaire pour atteindre le facteur de puissance demandé.

Des gradins de condensateurs sont connectés ou déconnectés en conséquence.

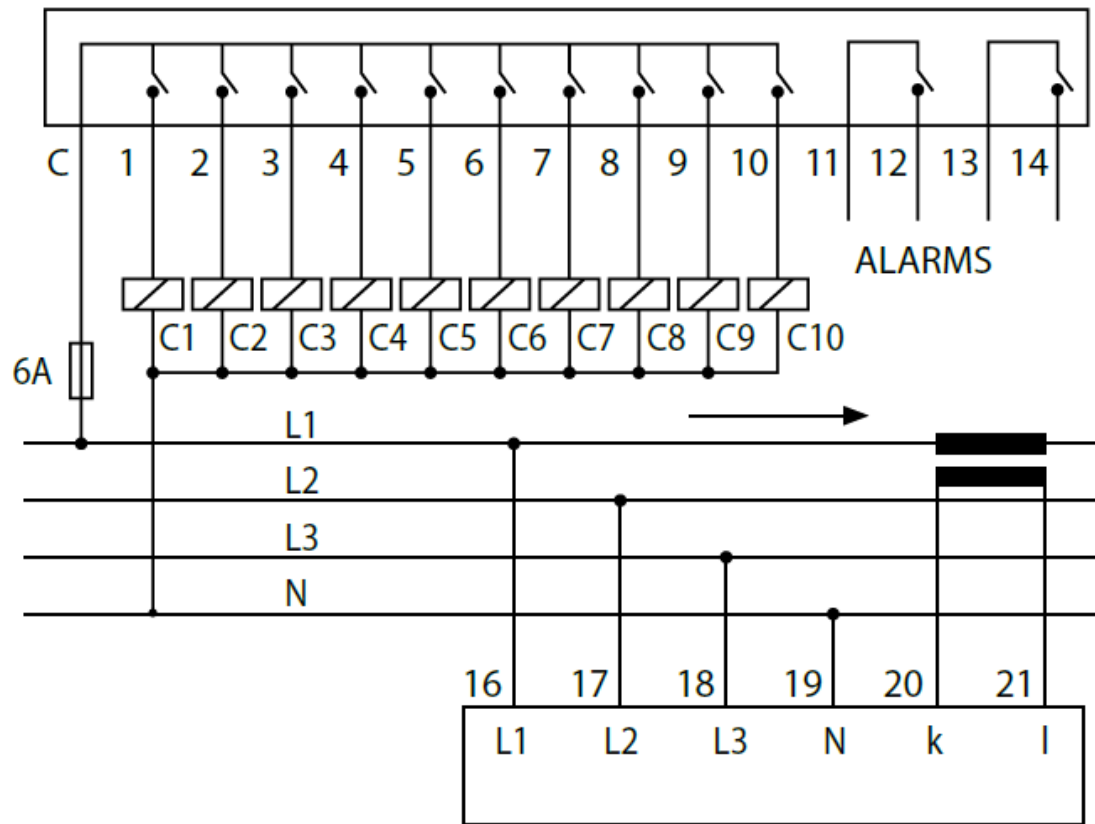


En mettant en place un tel système, il faut environ 10 ans pour avoir un retour sur investissement.

## Branchement du régulateur

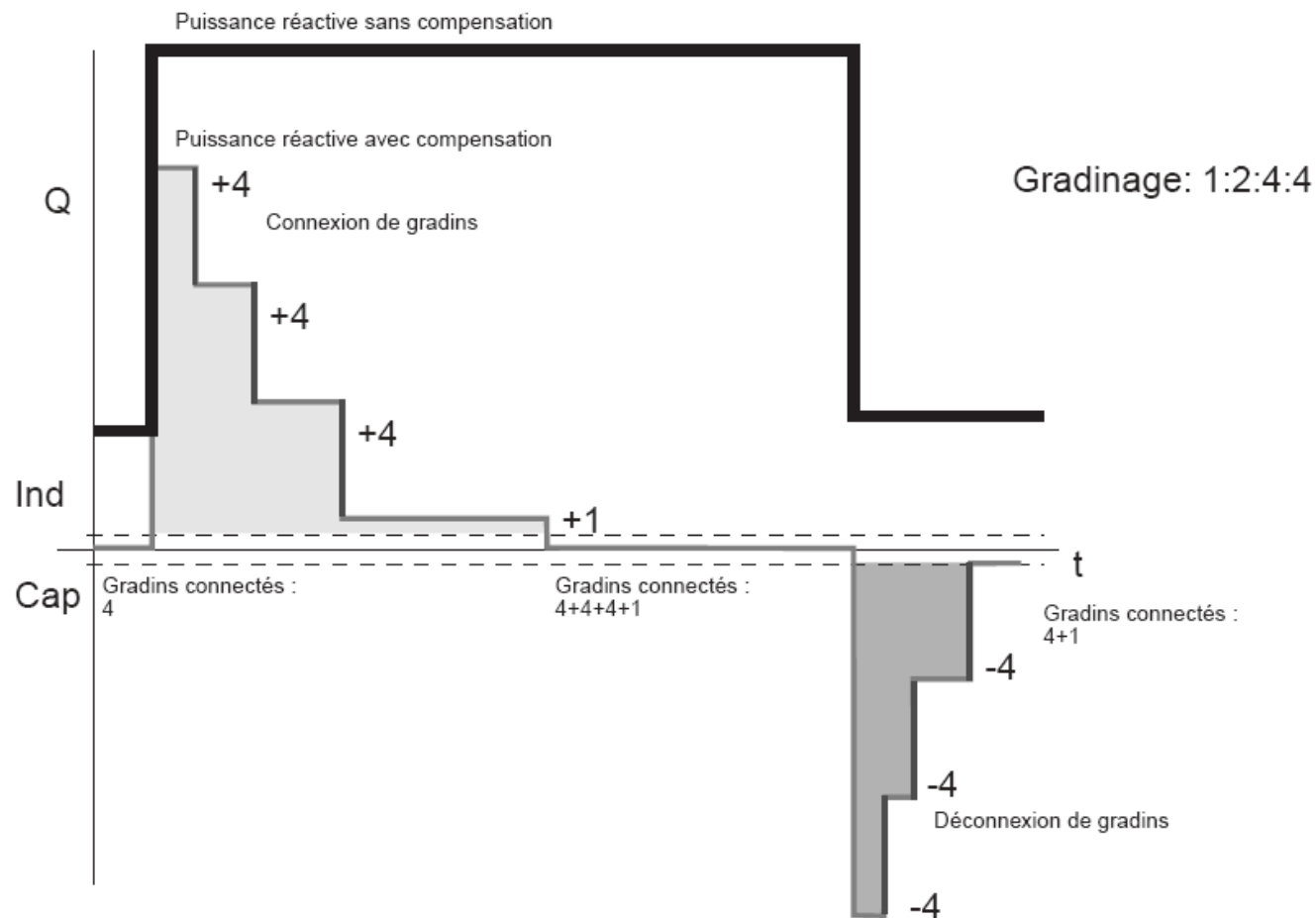
Le régulateur enclenche les contacteurs (ici 1 à 10).

Ceux-ci permettent de mettre en circuit les gradins de condensateurs (C1 à C10).

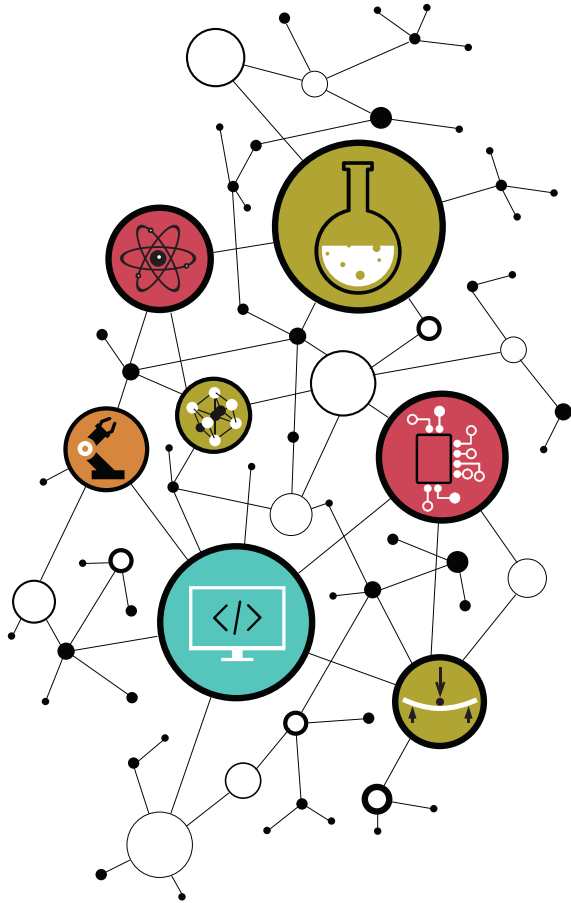


# RELÈVEMENT DU FACTEUR DE PUISSANCE

## Exemple de régulation de Q



## CONTACT



Dimitri Boudier – PRAG ENSICAEN  
[dimitri.boudier@ensicaen.fr](mailto:dimitri.boudier@ensicaen.fr)

Avec la participation de :

- Ahmed Aouchar (ex-PRAG ENSICAEN)
- Matthieu Denoual (MCF ENSICAEN)