

Courant continu

Le **courant continu** (qui peut être abrégé par **CC**, ou **DC**, pour *Direct Current* ou Couplage Direct en anglais, étant cependant souvent utilisé), par opposition au courant alternatif AC (couplage alterné), est un courant électrique unidirectionnel : le courant circule continuellement dans le même sens, le déplacement des électrons se fait toujours dans le même sens. Ce courant électrique est exprimé en ampère (exemple $I = 1 \text{ A}$ correspond à environ $6,24 \cdot 10^{18}$ électrons par seconde ($I = Q/t$), I en ampère, Q en coulomb et t en seconde). Les électrons circulent de manière opposée au sens conventionnel du courant. Le courant I va du + vers le - à l'extérieur du générateur, les électrons font l'inverse. Ces courants sont produits par des générateurs délivrant des tensions également continues.

Classification

Le terme de **courant continu** recouvre plusieurs sens :

- **Courant constant** : le courant est totalement constant en direction et en amplitude au cours du temps. Les courants de ce type sont parfois appelés *courants parfaitement continus*.
- **Courant continu lissé** : c'est un courant qui s'approche du courant constant, mais qui conserve un certain taux d'ondulation.
- **Courant variable unidirectionnel** : c'est un courant qui ne change pas de sens mais dont l'amplitude varie au cours du temps.

Courant alternatif

Le **courant alternatif** (qui peut être abrégé par **CA**, ou **AC**, pour *Alternating Current* en anglais, étant cependant souvent utilisé) est un courant électrique qui change de sens.

Ce courant alternatif est dit périodique s'il change régulièrement et périodiquement de sens.

Un courant alternatif périodique est caractérisé par sa fréquence, mesurée en hertz (Hz). C'est le nombre d'« allers-retours » qu'effectue le courant électrique en une seconde. Un courant alternatif périodique de 60 Hz effectue 60 « allers-retours » par seconde, c'est-à-dire qu'il change 120 fois (60 allers et 60 retours) de sens par seconde.

La forme la plus utilisée de courant alternatif est le courant sinusoïdal, essentiellement pour la distribution commerciale de l'énergie électrique.

La fréquence du courant électrique distribué par les réseaux aux particuliers est généralement de 60 Hz en Amérique du Nord et 50 Hz en Europe.

On doit distinguer :

- Les courants *purement alternatifs* dont la valeur moyenne (composante continue) est nulle, qui peuvent alimenter un transformateur sans danger.
- Les courants alternatifs à composante continue non nulle qui ne peuvent en aucun cas alimenter un transformateur.

Historique

Aux États-Unis, le physicien Nikola Tesla en 1882 conçoit l'alternateur triphasé. Parallèlement, en France, Lucien Gaulard invente le transformateur. Ces deux inventions permettent de surmonter les limitations imposées par l'utilisation du courant continu pour la distribution de l'électricité alors préconisée par Thomas Edison qui avait déposé de nombreux brevets en rapport avec cette technologie (et possédait des réseaux de distribution de courant continu).

Les avantages apportés par le transport et la distribution de l'énergie électrique par courants alternatifs sont indéniables. L'industriel Westinghouse, détenteur des brevets, finit par l'imposer aux États-Unis.

Avantages

Contrairement au courant continu, le **courant purement alternatif** peut voir ses caractéristiques (tension/courant) modifiées par un transformateur à enroulements. *Dès qu'il existe une composante continue non négligeable, un transformateur est inutilisable.*

Grâce au transformateur :

- le courant transporté par des réseaux de distribution haute tension subit des pertes par effet Joule beaucoup plus faibles. En divisant simplement par 10 l'intensité du courant transporté, on divise par 100 les pertes dues à la résistance des câbles électriques, la puissance dissipée dans une résistance étant proportionnelle au carré de l'intensité du courant ($P = RI^2$) ;
- à puissance constante, on peut réduire fortement l'intensité d'un courant alternatif en augmentant sa tension et
- on abaisse ensuite la tension afin de fournir une alimentation en basse tension près du lieu de distribution, afin de pouvoir l'utiliser à des fins domestiques (le danger restant toutefois bien réel, même en basse tension).

Les courants alternatifs sinusoïdaux

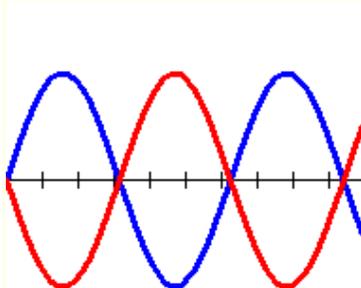


Figure 2b

Exemple de signaux sinusoïdaux

Un courant alternatif sinusoïdal est un signal sinusoïdal de grandeur homogène à un courant (exprimé en ampères). De façon stricte, sa composante continue doit être nulle pour le qualifier d'alternatif, la sinusoïde aura donc une valeur moyenne égale à zéro.

D'un point de vue mathématique

Le courant a donc une équation du type : $i(t) = A \cdot \sin\left(\frac{2\pi \cdot t}{T} + \varphi\right)$, ou

$i(t) = A \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t + \varphi)$, puisque $f = \frac{1}{T}$, avec A l'amplitude du signal, T la période du signal exprimée en secondes, et φ le déphasage, ou phase à l'origine, exprimé en radians.

Généralement on résume cette équation à $s(t) = A \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi)$, avec ω la pulsation (exprimée en rad/s) qui correspond donc à notre $2\pi \cdot f$ ou $\frac{2\pi}{T}$.

De façon stricte, un courant alternatif sinusoïdal est autant de temps ($T/2$) positif que négatif, ce qui implique que sa composante continue soit nulle. La sinusoïde oscillera donc de façon équilibrée autour de 0, impliquant une valeur moyenne

(mathématiquement) nulle, et une valeur efficace (électriquement) de $\frac{A}{\sqrt{2}}$.

On dit de ces deux signaux qu'ils sont identiques mais déphasés de π . Entre leurs deux équations, il y a donc seulement le déphasage (ou phase à l'origine) qui diffère.

En réalité, l'important est que la différence des phases à l'origine vaut $\varphi_{\text{bleu}} - \varphi_{\text{rouge}} = z\pi$ avec z un entier impair, puisqu'un tel déphasage (π radians correspondant à 180 degrés) correspond à un décalage d'un demi-tour sur le cercle trigonométrique. On associe donc à un signal, la valeur opposée de l'autre, car $\sin(x + z.\pi) = -\sin(x)$. Quand le signal bleu est au maximum, le rouge est au minimum, etc. On remarque donc que les deux signaux sont opposés, c'est-à-dire symétriques par l'axe des abscisses.

Les systèmes de phase

Monophasé

Le **monophasé** est un système de distribution d'énergie électrique dans lequel la tension électrique alternative est présente sur une ligne bifilaire. Il s'oppose aux systèmes polyphasés, tels que le triphasé, dans lequel plusieurs lignes sont utilisées et déphasées entre elles. Le monophasé est principalement utilisé pour l'éclairage et le chauffage, lorsque l'emploi de moteurs de forte puissance n'est pas nécessaire.

Conversion

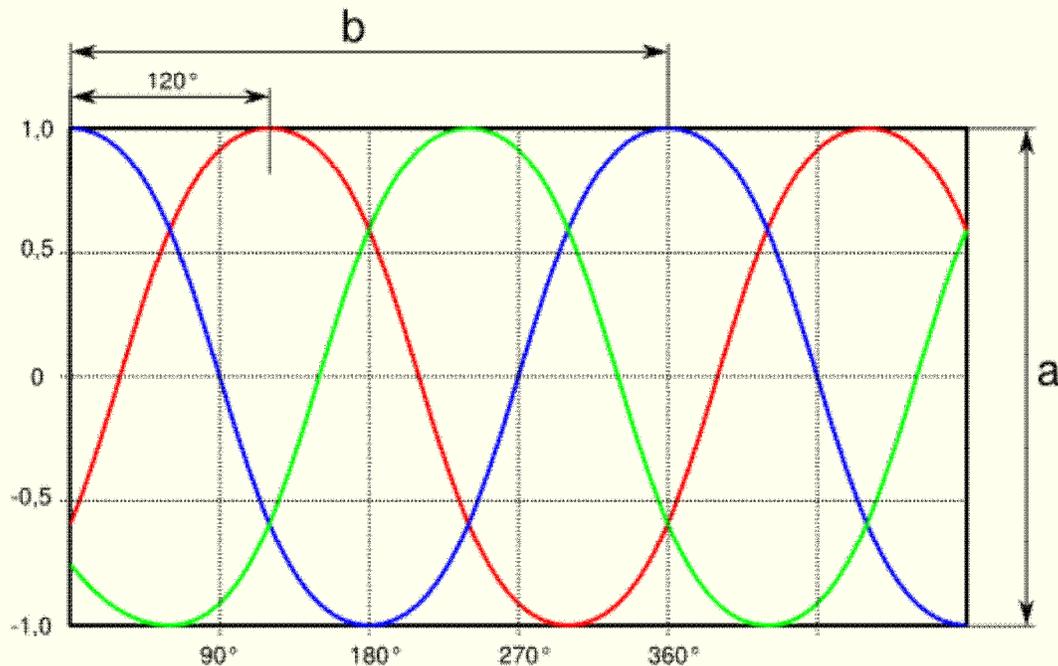
Un courant monophasé peut être produit à partir d'un courant triphasé en connectant une des trois phases et le neutre (typiquement 120V pour le réseau américain ou 230V pour le réseau européen) ou en connectant deux des trois phases (208V pour le réseau américain ou 400V pour le réseau européen).



Dans les systèmes de haute tension (quelques kilovolts), un transformateur monophasé peut être utilisé pour générer une basse tension à partir du triphasé. En Amérique du Nord l'enroulement primaire est connecté entre une phase et le neutre, tel que sur la photo ci bas (transformateur de faible puissance monophasé).

Note importante : un transformateur ne peut pas produire un système polyphasé à partir de monophasé.

Triphasé



L'alimentation électrique triphasée utilise quatre câbles, un pour chacune des trois phases, et un câble pour le neutre. Chacun des câbles est parcouru par un courant alternatif sinusoïdal déphasé par rapport aux deux autres câbles. Le neutre est généralement relié à la terre au départ, il n'est donc pas un câble de transport, à l'arrivée il est simplement recréé par un couplage en étoile des enroulements triphasés secondaires du transformateur de distribution basse tension (120/208 volts). Ce neutre est de nouveau relié à une prise de terre aux endroits où cela est nécessaire.

Le **triphase** est un système de trois tensions sinusoïdales de même fréquence et généralement de même amplitude qui sont déphasées entre elles (de 120° ou $2\pi/3$ radians dans le cas idéal). Si la fréquence est de 60 Hz par exemple, alors les trois phases sont retardées de $1/(60 \times 3)$ seconde (soit 5,55 millisecondes). Lorsque les trois conducteurs sont parcourus par des courants de même valeur efficace, le système est dit *équilibré*.

Le triphasé permet d'éviter les problèmes de puissance inhérent au système monophasé (en régime sinusoïdal). On peut démontrer que le triphasé délivre une puissance instantanée sans composante pulsée contrairement au système monophasé où la puissance instantanée est une sinusoïde. De plus, il offre un meilleur rendement dans les alternateurs et moins de perte lors du transport de l'électricité.

Définitions de base

Grandeurs triphasées

Un système de grandeurs triphasées peut se mettre sous la forme :

$$\begin{aligned}g_1 &= G_1 \sin(\omega t + \varphi_1) \\g_2 &= G_2 \sin\left(\omega t + \varphi_1 - \frac{2}{3}\pi\right) \\g_3 &= G_3 \sin\left(\omega t + \varphi_1 + \frac{2}{3}\pi\right)\end{aligned}$$

Systèmes triphasés équilibrés et déséquilibrés [\[modifier\]](#)

Un système de grandeurs (tensions ou courants) triphasées est dit *équilibré* si les 3 grandeurs, fonctions sinusoïdales du temps, ont la même amplitude : $G_1 = G_2 = G_3 = G$

Dans le cas contraire, le système triphasé est dit *déséquilibré*

Systèmes triphasés directs et inverses

Si les 3 grandeurs passent par la valeur 0 dans l'ordre 1, 2, 3, 1, ..., le système triphasé est dit *direct*. Il peut alors se mettre sous la forme :

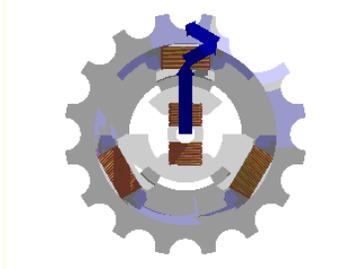
$$\begin{aligned}g_1 &= G_1 \sin(\omega t + \varphi_1) \\g_2 &= G_2 \sin\left(\omega t + \varphi_1 - \frac{2}{3}\pi\right) \\g_3 &= G_3 \sin\left(\omega t + \varphi_1 - \frac{4}{3}\pi\right) = G_3 \sin\left(\omega t + \varphi_1 + \frac{2}{3}\pi\right)\end{aligned}$$

Si les 3 grandeurs passent par la valeur 0 dans l'ordre 1, 3, 2, 1, ..., le système triphasé est dit *inverse*. Il peut alors se mettre sous la forme :

$$\begin{aligned}g_1 &= G_1 \sin(\omega t + \varphi_1) \\g_2 &= G_2 \sin\left(\omega t + \varphi_1 + \frac{2}{3}\pi\right) \\g_3 &= G_3 \sin\left(\omega t + \varphi_1 + \frac{4}{3}\pi\right) = G_3 \sin\left(\omega t + \varphi_1 - \frac{2}{3}\pi\right)\end{aligned}$$

Pour inverser l'ordre des phases, c'est à dire passer de l'ordre *direct* à l'ordre *inverse* et réciproquement, il suffit d'inverser le branchement de deux phases.

Distribution triphasée



Alternateur triphasé

Une distribution triphasée comporte 3 ou 4 fils

- Trois conducteurs de phase
- Un conducteur de neutre qui n'est pas systématique mais qui est souvent distribué.

Tensions simples

Les différences de potentiel entre chacune des phases et le neutre constituent un système de tensions triphasées notées généralement V (V_{1N} , V_{2N} , V_{3N}) et appelées *tensions simples*, *tensions étoilées* ou *tensions de phase*. Mathématiquement, on peut noter :

$$\begin{aligned}v_1 &= V_1 \sqrt{2} \sin(\omega t + \varphi_1) \\v_2 &= V_2 \sqrt{2} \sin\left(\omega t + \varphi_1 - \frac{2}{3}\pi\right) \\v_3 &= V_3 \sqrt{2} \sin\left(\omega t + \varphi_1 - \frac{4}{3}\pi\right)\end{aligned}$$

V_i la valeur efficace, ω la pulsation, φ_i la phase à l'origine et t le temps.

Dans le cas de distributions équilibrées, on a $V_1 = V_2 = V_3 = V$.

Tensions composées

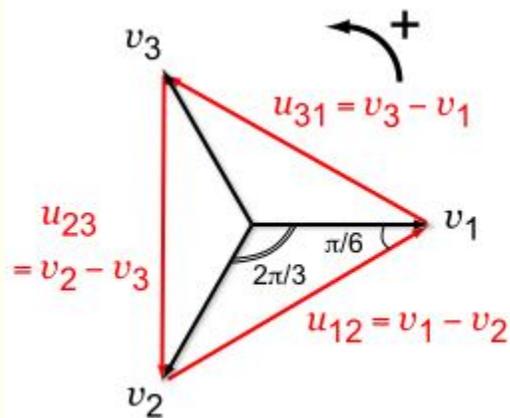
Les différences de potentiel entre les phases constituent un système de tensions notées généralement U : (U_{12} , U_{23} , U_{31}) et appelées **tensions composées** ou **tensions de ligne**.

$$u_{ij} = v_i - v_j = U_{ij} \sqrt{2} \sin(\omega t + \varphi_{ij})$$

Les tensions composées constituent un système de tensions triphasées si et uniquement si le système de tensions simples est un système équilibré. La somme des trois tensions composées est toujours nulle. Il en résulte que la composante homopolaire des tensions entre phases est toujours nulle (voir ci-dessous transformation de Fortescue).

Dans le cas de distributions équilibrées, on a : $U_{12} = U_{23} = U_{31} = U$

Relation entre tensions simples et composées



Représentation de Fresnel des tensions simples et composées pour un système équilibré direct

Nous avons reporté sur la figure ci-contre le diagramme de Fresnel des tensions simples et composées délivrées par un système triphasé équilibré direct. En observant, par exemple, le triangle isocèle formé par les tensions v_1, v_2 et u_{12} , nous pouvons remarquer que celui-ci a deux angles aigus de $\pi / 6$ radians (soit 30 degrés). On peut ainsi exprimer la valeur efficace de la tension composée U en fonction de la valeur efficace de la tension simple V à travers la relation :

$$U = 2 \times V \times \cos(\pi/6)$$

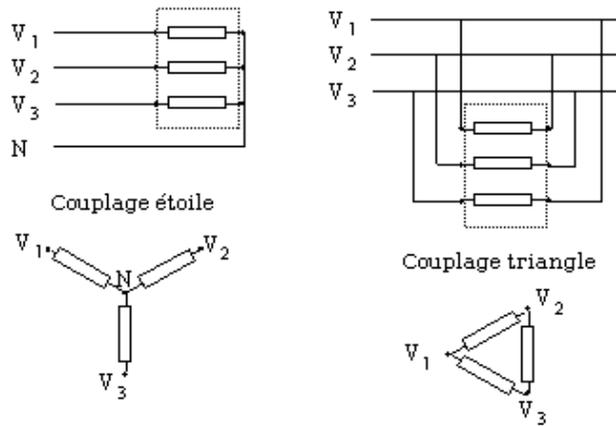
Il en va de même dans le cas d'un système équilibré indirect.

Par conséquent, dans un **système triphasé équilibré**, les valeurs efficaces des tensions simples et composées sont reliées par la relation :

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

Récepteurs triphasés

Un récepteur triphasé est constitué de trois dipôles aussi appelés *enroulements* ou *phases*. Si ces trois dipôles ont la même impédance, le récepteur est dit *équilibré*. Un récepteur triphasé peut être relié à l'alimentation de deux manières :



La littérature anglophone désigne habituellement les couplages triangle et étoile par des noms de lettres : Triangle / Delta (Δ) - Étoile / Wye (Y).

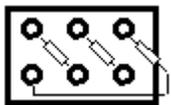
Un récepteur équilibré alimenté par un système équilibré de tensions absorbera trois courants de ligne formant également un système triphasé équilibré.

Intensités

Les *courants de ligne* ou *courants composés* sont notés I . Les courants qui traversent les éléments récepteurs sont appelés *courants de phase* ou *courants simples* et sont notés J .

Connexion d'un récepteur triphasé

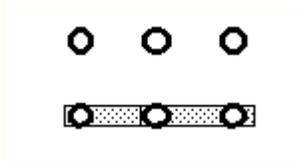
Les trois dipôles qui constituent le récepteur triphasé sont reliés à 6 bornes conventionnellement disposées comme l'indique la figure ci-dessous.



L'avantage de cette disposition est de permettre la réalisation des deux couplages avec des barrettes d'égale longueur, la distance entre deux bornes contiguës étant constante. L'appareil est fourni avec trois barrettes identiques dont la longueur permet un câblage horizontal ou vertical. On doit utiliser ces barrettes de connexion afin de réaliser les couplages désirés :

Couplage étoile

Le couplage étoile des enroulements (couplage le plus fréquent) s'obtient en plaçant deux barrettes de connexions de la manière suivantes :



Les trois bornes restantes seront câblées avec les trois conducteurs de phases.

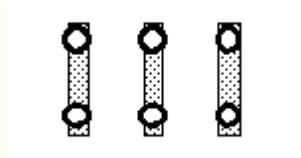
Les trois bornes reliées ensemble par les deux barrettes constituent un point qui sera au potentiel du neutre. Ce point peut être relié au neutre de la distribution, mais ce n'est pas une obligation, cela est même fortement déconseillé pour les machines électriques.

Dans un couplage *étoile*, les courants de ligne et de phase sont les mêmes, aussi on note :

$$I = J$$

Couplage triangle

Le couplage triangle des enroulements s'obtient en plaçant trois barrettes de connexions de la manière suivante :



Un câble de phase est relié ensuite à chaque barrette. Le câble de neutre n'est pas connecté.

Dans un couplage *triangle*, il est nécessaire de décomposer chaque courant traversant les récepteurs. Ainsi, on a :

$$I_1 = J_{21} - J_{31}$$

$$I_2 = J_{23} - J_{21}$$

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

Les valeurs efficaces des courants de ligne et de phase sont liés par la relation :

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

Plaques signalétiques des récepteurs triphasés

La plaque signalétique d'un récepteur triphasé précise la valeur des deux tensions entre phases permettant de l'alimenter :

Exemple

chauffe-eau : 230 V / 400 V :

- la première valeur est la *tension entre phase* requise pour câbler le récepteur *en étoile* ;
- la deuxième valeur est la *tension entre phase* requise pour câbler le récepteur *en triangle*.

Puissance consommée par un récepteur triphasé

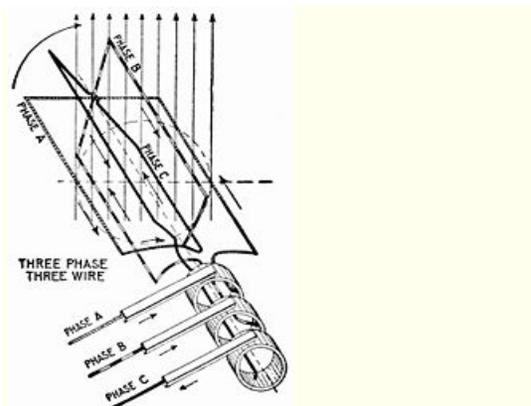
Puissance active [modifier]

Le théorème de Boucherot impose que cela soit la somme des puissances consommées par chacun des dipôles :

- en étoile : $P = V_1 I_1 \cos \varphi_1 + V_2 I_2 \cos \varphi_2 + V_3 I_3 \cos \varphi_3$ soit, en régime équilibré : $P = 3 \cdot VI \cdot \cos \varphi_{v/i}$
- en triangle : $P = U_1 J_1 \cos \varphi_1 + U_2 J_2 \cos \varphi_2 + U_3 J_3 \cos \varphi_3$ soit, en régime équilibré : $P = 3 \cdot UJ \cdot \cos \varphi_{u/j}$
- Pour les récepteurs équilibrés et quel que soit le couplage, on peut écrire :
 $P = \sqrt{3} \cdot UI \cdot \cos \varphi$.

Remarque : Dans ce cas, φ n'est pas le déphasage entre \underline{U} et \underline{I}

Intérêt du triphasé



Autre vue d'un alternateur triphasé
(*Hawkins Electrical Guide*, 1917)

Intérêt pour le transport de l'électricité

Le transport en triphasé permet d'économiser du câble et de diminuer les pertes par effet joule : trois fils de phases suffisent (le neutre n'est pas transporté, il est «recréé» au niveau du dernier transformateur). En effet, le déphasage entre chaque phase est tel que, pour un système équilibré, la somme des trois courants est supposée nulle (si les trois courants ont la même amplitude, alors

$$\cos(x) + \cos\left(x + \frac{2}{3}\pi\right) + \cos\left(x + \frac{4}{3}\pi\right) = 0).$$

Et donc, en plus de faire l'économie d'un câble sur les longues distances, on économise en prime sur les effets joule (un câble supplémentaire traversé par un courant impliquerait des pertes supplémentaires).

Intérêt pour la production de l'électricité

De meilleurs alternateurs

L'alternateur triphasé s'est imposé dès l'origine (avant 1900) comme le meilleur compromis². Plus de 95 % de l'énergie électrique est produite par des alternateurs synchrones, des machines électromécaniques fournissant des tensions de fréquences proportionnelles à leur vitesse de rotation. Ces machines sont moins coûteuses et ont un meilleur rendement que les machines à courant continu (dynamos) qui délivrent des tensions continues (95 % au lieu de 85 %).

Les alternateurs (machines synchrones) triphasés qui produisent l'énergie électrique ont un meilleur rendement et un meilleur rapport *poids/puissance* qu'un alternateur monophasé de même puissance.