

Lycée technique Mohammedia

Sciences de l'ingénieur

Module A.D.C.

Cours

Nom :

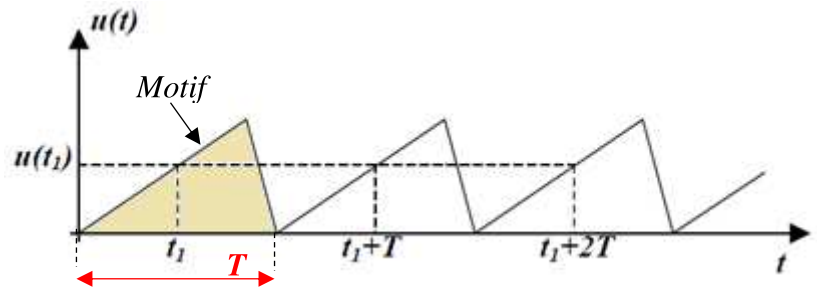
2 STE ...

Année scolaire : 2023-2024

1 Grandeurs variables périodiques

11. Définition

Une grandeur analogique (tension ou intensité) **périodique** est constituée par : **une suite de motifs identiques**.



12. Période

$u(t_1) = u(t_1 + T)$, T est la période. Elle correspond à du motif ; elle s'exprime en seconde (s).

13. Fréquence

La fréquence du signal est le **nombre de périodes par seconde**. Elle s'exprime en fonction de la période par la relation suivante : $f = \dots\dots$ s'exprime en Hertz (Hz) et T en seconde (s).

14. Valeur instantanée

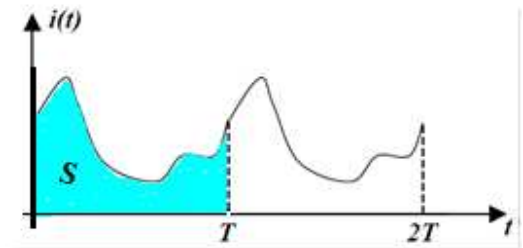
La valeur instantanée d'une grandeur variable est la valeur qu'elle prend à tout instant ; on la note par une **minuscule** : $u(t)$ ou u .

15. Valeur moyenne

La valeur moyenne d'un signal périodique $i(t)$ est la moyenne des valeurs instantanées mesurées sur une période complète. Si T désigne la période du signal $i(t)$ alors la valeur moyenne est donnée par :

$$\langle i \rangle = \frac{\text{Surface de } i(t)}{T} = \frac{S}{T}$$

S : représente la **surface de $i(t)$** pour une période T .



Mesure

Pour mesurer la valeur moyenne d'une tension ou de l'intensité d'un courant, on utilise des appareils à **aiguille magnétoélectriques** en position **DC** (Direct Current), ou des **appareils numériques** en position **DC**.

Signal alternatif

Un signal est dit alternatif si sa **valeur moyenne est**

16. Valeur efficace

Si T désigne la période du signal $i(t)$ alors la valeur efficace est donnée par : $I = \sqrt{\frac{\text{Surface de } i^2(t)}{T}} = \sqrt{\frac{S^2}{T}}$

Mesure

Pour mesurer la valeur efficace d'une tension ou de l'intensité d'un courant on utilise des appareils à **aiguille ferromagnétiques**, ou des **appareils numériques RMS** (ou **TRMS**) en position **AC** (Alternative Current).

2 Grandeurs alternatives sinusoïdales

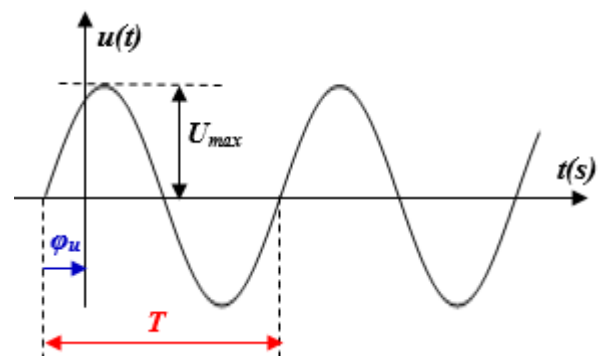
21. Définitions

Une grandeur alternative sinusoïdale est une grandeur **périodique** dont la valeur instantanée est une fonction sinusoïdale du temps.

L'expression temporelle de la tension est :

$$u(t) = U_{\max} \sin(\omega t + \varphi_u)$$

$$\text{ou } u(t) = U\sqrt{2} \sin(\omega t + \varphi_u)$$



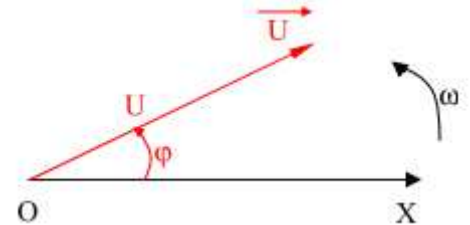
- Avec :
- u ou $u(t)$ est la valeur instantanée de la tension.
 - U_{max} est la valeur maximale ou amplitude de u , $U_{max} = U\sqrt{2}$.
 - U est la valeur efficace de u (valeur mesurée par un voltmètre AC).
 - ω est la pulsation ou vitesse angulaire en rad/s, $\omega = 2\pi f = 2\pi/T$.
 - $\omega t + \varphi_u$ est la phase à l'instant t exprimée en radian.
 - φ_u est la phase à l'origine ($t=0$).

22. Représentation de Fresnel (représentation graphique)

La **représentation de Fresnel** ou diagramme de **Fresnel** est un outil graphique permettant d'ajouter, de soustraire, de dériver et d'intégrer des fonctions sinusoïdales de même fréquence.

Soit la tension : $u(t) = U\sqrt{2} \sin(\omega t + \varphi)$ →

On associe donc à cette tension un vecteur \vec{U} (vecteur de Fresnel) tournant à la vitesse ω et on le représente à l'instant $t = 0$.



Norme du vecteur de \vec{U} ↔ Valeur efficace U de $u(t)$
 Angle entre vecteur et l'axe OX ↔ Phase à l'origine φ de $u(t)$

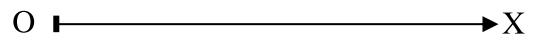
Remarque : cette représentation demande d'établir une échelle.

Exemple

Représenter par leur vecteur de Fresnel ces deux tensions :

$$u_1(t) = 2\sqrt{2} \sin(\omega t + \frac{\pi}{4}) \quad \text{Echelle : } 1V = 1cm$$

$$u_2(t) = 2\sqrt{2} \sin(\omega t - \frac{\pi}{6})$$



Remarque : il est nécessaire d'utiliser une échelle.

23. Représentation par un nombre complexe

Le vecteur de Fresnel est un outil intéressant mais il conduit à des diagrammes vectoriels et donc à une résolution graphique (des problèmes).

On utilise donc un autre outil pour étudier un circuit en régime sinusoïdal :

À une grandeur sinusoïdale $u(t)$, on associe une grandeur complexe \underline{U} . On a :

Module U de \underline{U} ↔ Valeur efficace U de $u(t)$
 Argument φ de \underline{U} ↔ Phase à l'origine φ de $u(t)$

$$u = U\sqrt{2} \sin(\omega t + \varphi) \leftrightarrow \underline{U} = (U; \varphi) = U \cdot \cos \varphi + j U \cdot \sin \varphi$$

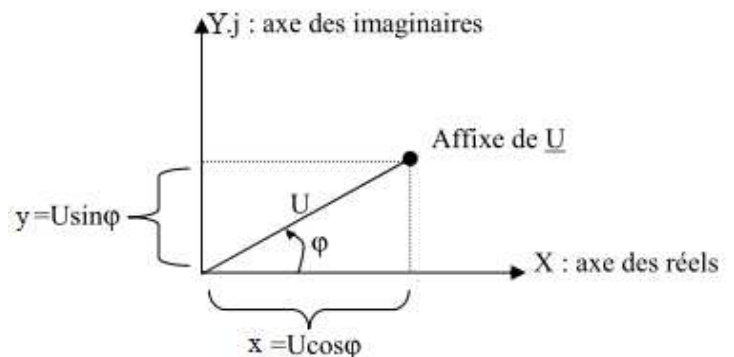
Rappels sur les complexes

$$\underline{U} = (U; \varphi) = U \cdot \cos \varphi + j \cdot U \cdot \sin \varphi = x + j \cdot y$$

$$\underline{U} = (U; \varphi) \Rightarrow \text{forme Polaire}$$

$$\underline{U} = x + j y \Rightarrow \text{forme Rectangulaire}$$

Remarque : le passage d'une forme à l'autre (rectangulaire ↔ polaire) se fait rapidement avec les **calculatrices scientifiques**.



Opérations sur les nombres complexes

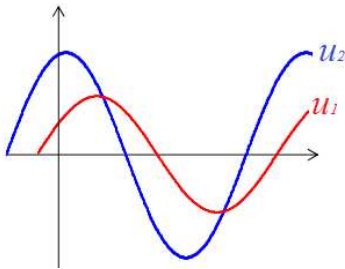
Soient :

- **Addition** : $\underline{Z} = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 = (x_1 + x_2) + j(y_1 + y_2)$.
- **Multiplication** : $\underline{Z} = \underline{Z}_1 \cdot \underline{Z}_2 = [Z_1 \cdot Z_2; \varphi_1 + \varphi_2]$ φ_1 et φ_2 arguments de \underline{Z}_1 et \underline{Z}_2 .
- **Division** : $\underline{Z} = \underline{Z}_1 / \underline{Z}_2 = [Z_1 / Z_2; \varphi_1 - \varphi_2]$.
- **Dérivée** : $(\underline{Z})' = j\omega \cdot \underline{Z}$.

24. Déphasage

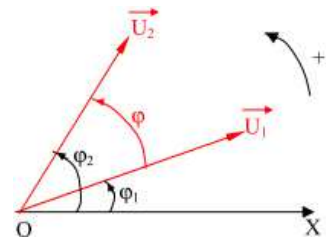
Lorsqu'on observe à l'oscilloscope deux tensions de même fréquence sur un même circuit, on constate qu'elles sont décalées : on dit qu'il existe une différence de phase ou **déphasage**.

Soient deux tensions de même fréquence : $u_1 = U_1\sqrt{2} \sin(\omega t + \varphi_1)$ et $u_2 = U_2\sqrt{2} \sin(\omega t + \varphi_2)$



On peut les représenter par leurs vecteurs de Fresnel

$\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$ déphasage de u_1 par rapport à u_2



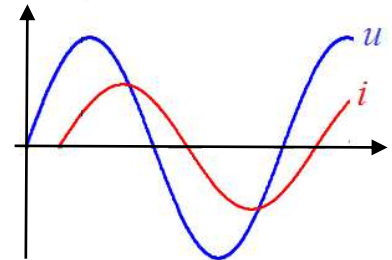
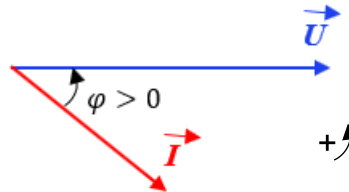
Déphasage d'un courant i par rapport à la tension u - Avance ou retard

On a une tension et un courant sinusoïdaux de pulsation ω :

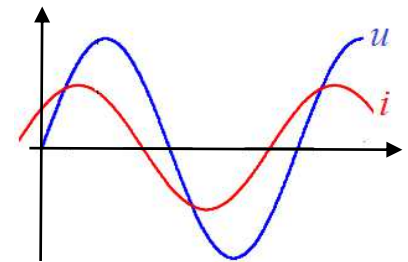
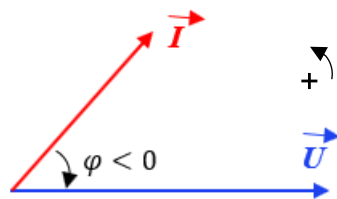
- $u(t) = U\sqrt{2} \sin \omega t$ (tension prise comme référence)
- $i(t) = I\sqrt{2} \sin(\omega t - \varphi)$

Donc, le déphasage de i par rapport à u est l'angle $\varphi = (\vec{I}, \vec{U})$

$\varphi > 0$
On dit alors que :
 i est en **retard** sur u



$\varphi < 0$
On dit alors que :
 i est en **avance** sur u

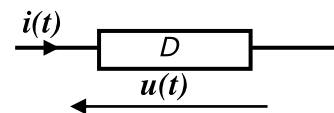


Cas particuliers :

- $\varphi = 0 \rightarrow u$ et i sont en phase.
- $\varphi = \pi/2 \rightarrow i$ est en quadrature arrière par rapport à u .
- $\varphi = -\pi/2 \rightarrow i$ est en quadrature avant par rapport à u .

3 Loi d'Ohm en régime sinusoïdal

Considérons un dipôle D passif, linéaire alimenté en régime sinusoïdal.



Les grandeurs $u(t)$ et $i(t)$ s'expriment de la façon suivante :

$$\begin{cases} u(t) = U \cdot \sqrt{2} \sin \omega t \\ i(t) = I \cdot \sqrt{2} \sin(\omega t - \varphi) \end{cases}$$

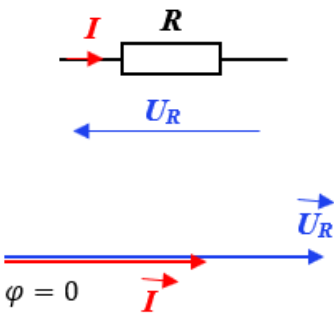
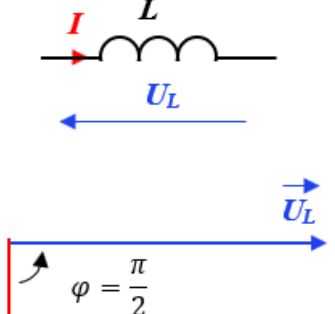
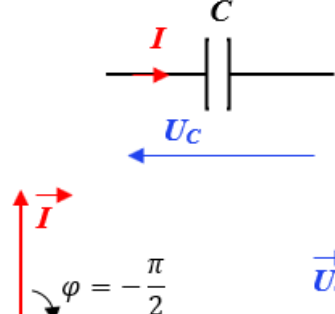
Où U et I : les valeurs efficaces de $u(t)$ et $i(t)$ et $\varphi = (\vec{I}, \vec{U})$ déphasage du courant i par rapport à la tension u .

31. Énoncé

- **Loi d'Ohm** en régime sinusoïdal s'exprime par $U = Z \cdot I$
- Le rapport $Z = U/I$ des valeurs efficaces de $u(t)$ et $i(t)$ est **constant** et appelé **impédance** du dipôle et s'exprime en **Ohm (Ω)**.

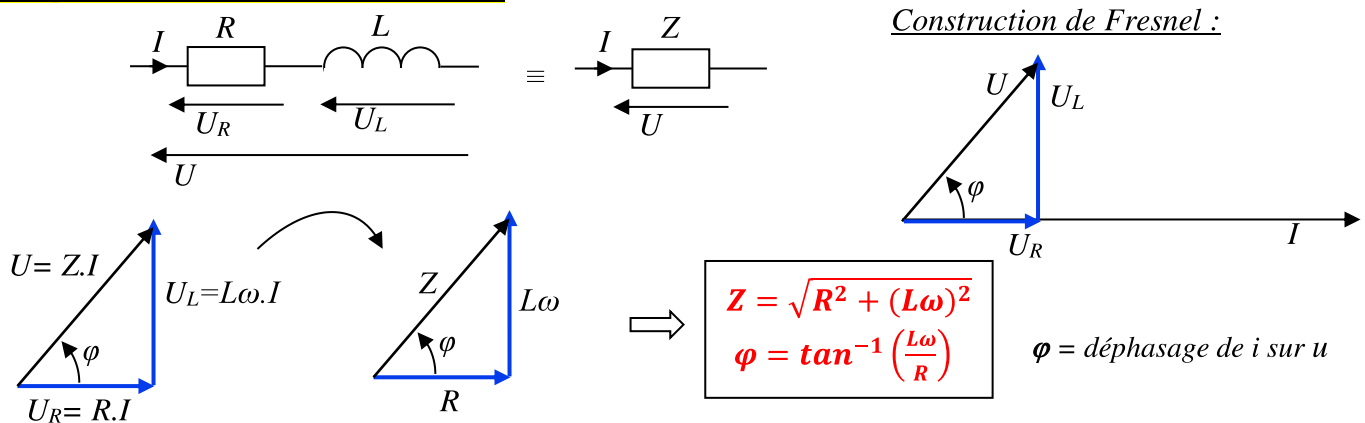
32. Dipôles élémentaires

Tout dipôle D passif et linéaire peut être vu comme un groupement constitué d'un ou plusieurs dipôles élémentaires. Ces dipôles passifs élémentaires sont au nombre de 3 : la **résistance**, la **bobine parfaite** ou **inductance**, le **condensateur**.

Résistance R	Bobine parfaite L	Condensateur C
<p>R : résistance s'exprime en Ohm (Ω).</p>  <p>$Z_R = R$ et $\varphi = 0$</p>	<p>L : inductance s'exprime en Henry (H).</p>  <p>$Z_L = L\omega$ et $\varphi = \frac{\pi}{2}$</p>	<p>C : capacité s'exprime en Farad (F).</p>  <p>$Z_C = \frac{1}{C\omega}$ et $\varphi = -\frac{\pi}{2}$</p>
<p>Impédance complexe :</p> <p>$\underline{Z}_R = R$</p>	<p>Impédance complexe :</p> <p>$\underline{Z}_L = jL\omega$</p>	<p>Impédance complexe :</p> <p>$\underline{Z}_C = \frac{1}{jC\omega}$</p>

33. Association de dipôles en série

Groupement série R, L : (bobine réelle)



Autres groupements

Groupement série	R, L	R, C	R, L, C
Impédance du groupement	$Z = \sqrt{R^2 + (L\omega)^2}$	$Z = \sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{C\omega}\right)^2}$	$Z = \sqrt{R^2 + \left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right)^2}$
Déphasage φ de i sur u	$\varphi = \tan^{-1}\left(\frac{L\omega}{R}\right)$	$\varphi = \tan^{-1}\left(\frac{-1}{RC\omega}\right)$	$\varphi = \tan^{-1}\left(\frac{L\omega - \frac{1}{C\omega}}{R}\right)$

Remarque sur le circuit RLC série :

- Si : $L\omega > 1/C\omega \rightarrow \varphi > 0$ le dipôle est **inductif** et i est en retard par rapport à u .
- $1/C\omega > L\omega \rightarrow \varphi < 0$ le dipôle est **capacitif** et i est en avance par rapport à u .
- $L\omega = 1/C\omega \rightarrow \varphi = 0$ le dipôle est **résistif** et i est en phase avec u .

4 Puissances en alternatif. Théorème de Boucherot. Facteur de puissance

41. Puissances

La puissance électrique **instantanée** est le produit de la **tension** par le **courant**.

$$u(t) = U\sqrt{2} \sin \omega t \text{ et } i(t) = I\sqrt{2} \sin (\omega t - \varphi).$$

$$p(t) = U\sqrt{2} \sin \omega t \cdot I\sqrt{2} \sin (\omega t - \varphi) = 2UI \sin \omega t \cdot \sin (\omega t - \varphi) = U \cdot I \cdot \cos \varphi - U \cdot I \cdot \cos (2\omega t - \varphi).$$

On constate que la puissance instantanée est la somme :

- D'un terme **constant** " $U \cdot I \cdot \cos \varphi$ ";
- Et d'un terme **variant périodiquement** " $U \cdot I \cdot \cos (2\omega t - \varphi)$ ".

Puissance active

Par définition la puissance active est **la moyenne** de la puissance instantanée.

La valeur moyenne du terme périodique est nulle (c'est une fonction périodique alternative). Il reste donc le terme constant.

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi \quad \text{unité : le watt (W)}.$$

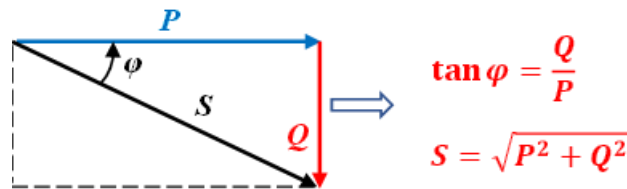
Puissance réactive

$$Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi \quad \text{unité : le voltampère réactif (VAR)}.$$

Puissance apparente

$$S = U \cdot I \quad \text{unité le voltampère (VA)}.$$

Triangle des puissances



42. Puissances consommées par les dipôles passifs élémentaires

	Résistance R	Inductance L	Condensateur C
Puissance active P (W)	$P = UI = \dots = \dots$ R absorbe la puissance active	$P = \dots$	$P = \dots$
Puissance réactive Q (VAR)	$Q = \dots$	$Q = UI = \dots = \dots$ L absorbe la puissance réactive	$Q = -UI = -\dots = -\dots$ C fournit la puissance réactive
Puissance apparente S (VA)	$S = P$	$S = Q$	$S = -Q$

43. Théorème de Boucherot

Les puissances active et réactive absorbées par un groupement de dipôles sont respectivement égales à la somme des puissances actives et réactives absorbées par chaque élément du groupement.

$$P_t = \sum P_i \text{ et } Q_t = \sum Q_i$$

5 Facteur de puissance ($\cos \varphi$)

51. Importance du facteur de puissance ($\cos \varphi$)

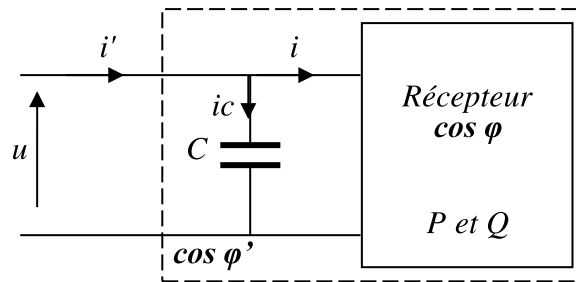
La tension U étant imposée par le réseau (230 V, ...) et la puissance P étant imposée par l'installation électrique à alimenter, le courant s'adapte suivant la relation $I = P / U \cdot \cos \varphi$.

- **Problème économique** : **plus I est faible, plus les pertes sont faibles**. Pour diminuer I sans modifier P ou U , il faut augmenter $\cos \varphi$. On dit qu'il faut **relever le facteur de puissance**.
- **Problème électrique** : comment modifier $\cos \varphi$ sans modifier la puissance active P ? Le facteur de puissance peut s'exprimer de la façon suivante : $\cos \varphi = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}}$.

Donc, plus Q se rapproche de 0 , plus $\cos \varphi$ se rapproche de 1 . En rajoutant à l'installation électrique des condensateurs, on modifie Q sans modifier P .

52. Relèvement du facteur de puissance

Dans la plupart des situations la charge est **inductive** (transformateurs, moteurs, chauffage, ...). Pour relever son facteur de puissance il faut donc y ajouter en parallèle un **condensateur**.



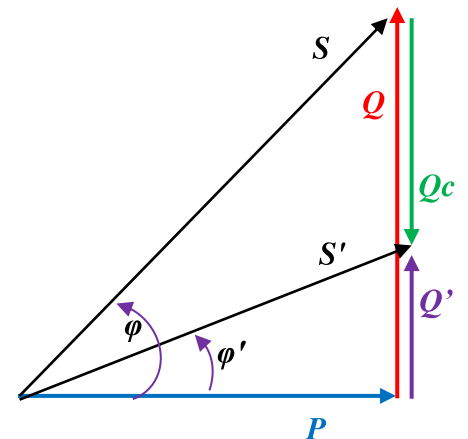
L'objectif est de dimensionner le condensateur en fonction du facteur de puissance recherché $\cos \varphi'$

	Puissance active	Puissance réactive
Récepteur seul	P	$Q = P \cdot \tan \varphi$
Condensateur	0	$Q_C = - C \cdot \omega \cdot U^2$
L'ensemble	P	$Q' = Q + Q_C = P \cdot \tan \varphi' \quad (1)$

On en déduit la capacité du condensateur de la manière suivante :

$$(1) \rightarrow Q_C = - C \cdot \omega \cdot U^2 = Q' - Q = P \cdot \tan \varphi' - P \cdot \tan \varphi$$

$$C \cdot \omega \cdot U^2 = P \cdot \tan \varphi - P \cdot \tan \varphi' \rightarrow C = \frac{P(\tan \varphi - \tan \varphi')}{\omega U^2}$$



1 Introduction

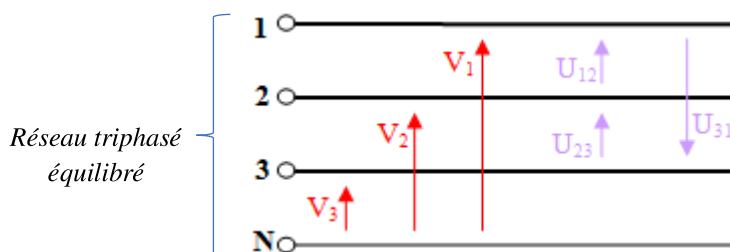
Les réseaux triphasés (*systèmes de tensions triphasées*) sont très répandus dans le monde industriel en raison de leurs nombreuses propriétés favorables à la production, au transport et à l'utilisation des grandeurs électriques.

2 Réseau triphasé équilibré

Un système triphasé est un réseau (*tensions ou courants*) sinusoïdales de même fréquence et déphasées, les unes par rapport aux autres, d'un angle de

Le système est **équilibré** si les grandeurs sinusoïdales sont de **même valeur efficace**. Il est **direct** si les phases sont ordonnées dans le sens trigonométrique et **inverse** dans l'autre cas.

21. Les tensions délivrées



Les tensions simples

Ce sont les **d.d.p** entre les divers conducteurs de phase et de point neutre (réel ou fictif) : v_1, v_2, v_3 .

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

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

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

Les tensions composées

Ce sont les **d.d.p** entre les conducteurs des phases consécutives : U_{12}, U_{23}, U_{31} .

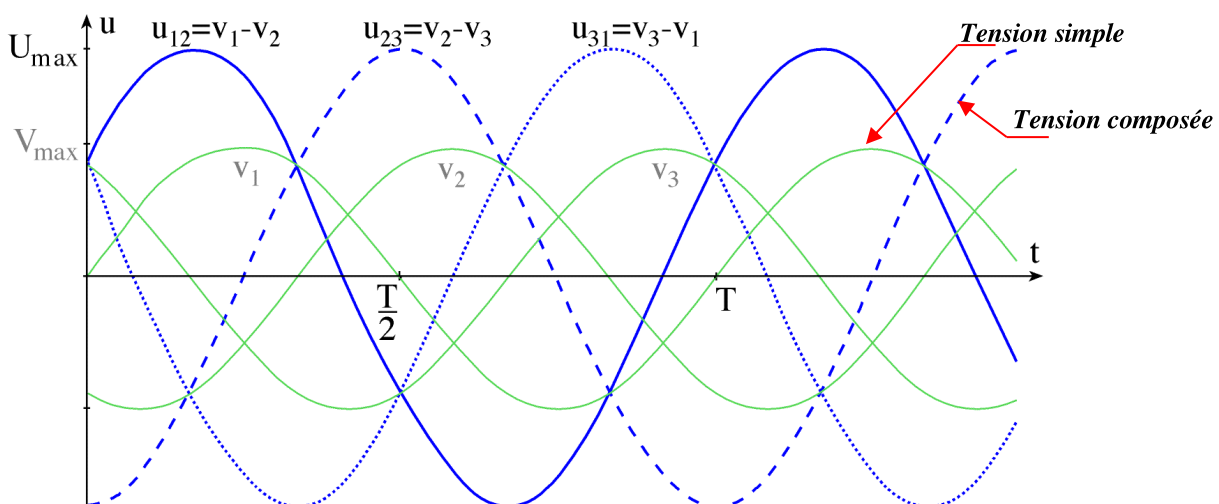
Exemple : $u_{12}(t) = v_1(t) - v_2(t)$

$$u_{12}(t) = V\sqrt{3}\sqrt{2} \cdot \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right)$$

$$u_{23}(t) = V\sqrt{3}\sqrt{2} \cdot \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$$

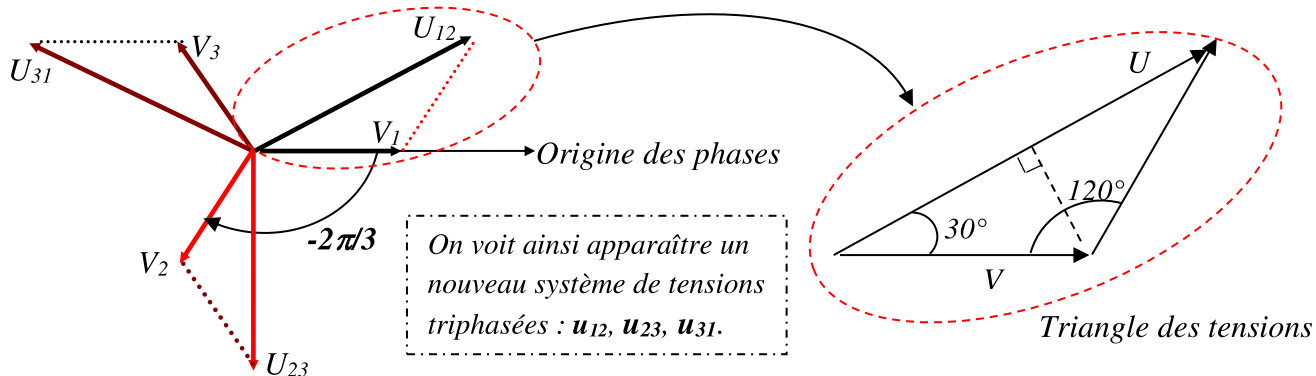
$$u_{31}(t) = V\sqrt{3}\sqrt{2} \cdot \sin\left(\omega t - \frac{7\pi}{6}\right)$$

Représentation temporelle de ces tensions



Représentation vectorielle de FRESNEL des tensions

A partir des expressions définies précédemment, il est possible de représenter les différentes tensions.



Propriété importante

La somme de trois grandeurs formant un système triphasé équilibré est nulle : $\vec{V}_1 + \vec{V}_2 + \vec{V}_3 = \vec{0}$

La relation qui existe entre la valeur efficace V et U se calcule facilement à partir du triangle des tensions ci-dessus : $2 \cdot V \cdot \cos(\pi/6) = U$ c'est à dire **$U = \dots V$**

Ainsi, un système triphasé à basse tension sur le réseau est intitulé : 230V/400V,

230V représentant la tension efficace et 400V la tension efficace.

3 Récepteurs triphasés équilibrés

31. Définitions

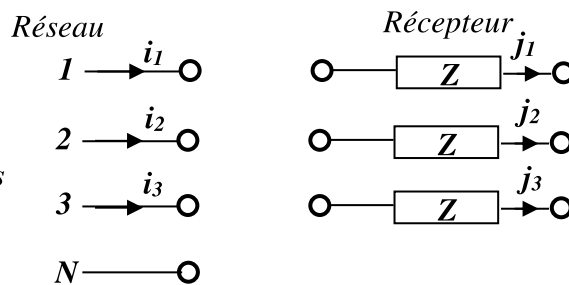
Récepteur triphasé : c'est un récepteur constitué de trois éléments d'impédance Z_1, Z_2 et Z_3 .

Équilibré : si $Z_1 = Z_2 = Z_3 = Z$ (les éléments sont identiques).

Courant par phase : c'est le courant qui traverse les éléments Z du récepteur triphasé. Symbole : J

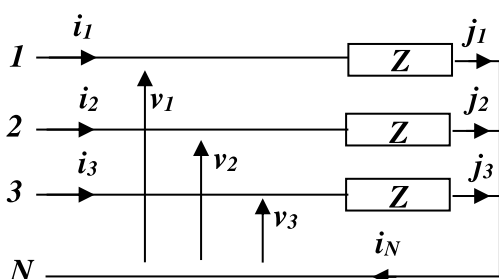
Courants en ligne : c'est le courant dans les fils du réseau triphasé. Symbole : I

Le réseau et le récepteur peuvent se relier de deux façons différentes : en étoile ou en triangle.

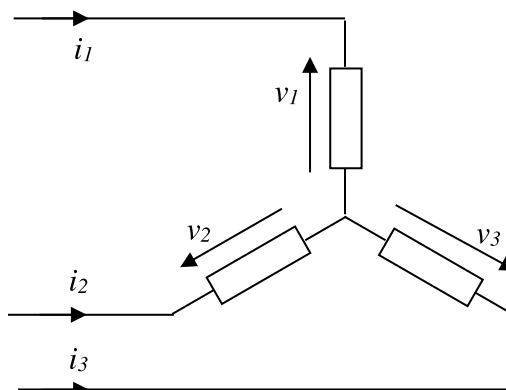


32. Couplage étoile

Montage



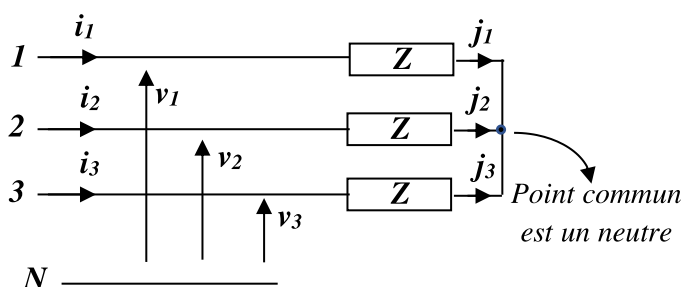
ou bien



Comme il s'agit des mêmes impédances, de ce fait **$i_1 + i_2 + i_3 = \dots$** , donc **$i_N = \dots$**

Le courant dans le fil neutre est nul. **Le fil neutre n'est donc pas nécessaire.**

Pour un système triphasé équilibré, le **fil neutre sert à rien.**



Relations entre les courants

On constate sur les schémas précédents que les courants en ligne sont égaux aux courants par phase.

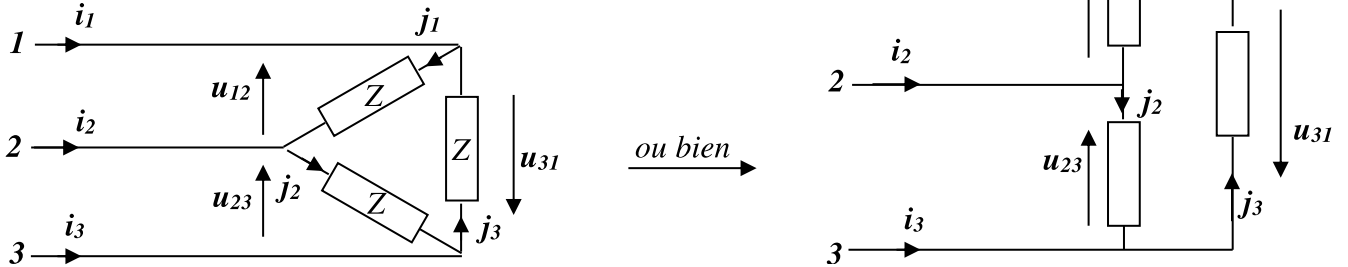
$$i_1 = j_1 ; i_2 = j_2 ; i_3 = j_3$$

De plus la charge et le réseau sont équilibrés, donc : $I_1 = I_2 = I_3 = I = J$

On retiendra pour le couplage étoile : **$I = \dots$**

33. Couplage triangle

Montage



Comme il s'agit des mêmes impédances, $i_1 + i_2 + i_3 = 0$ et $j_1 + j_2 + j_3 = 0$

Ici en aucun cas le fil neutre n'est nécessaire.

Relations entre les courants

D'après les schémas du montage triangle : $i_1 = \dots \Rightarrow I_1 = J_1 - J_3$

$$i_2 = \dots \Rightarrow I_2 = J_2 - J_1$$

$$i_3 = \dots \Rightarrow I_3 = J_3 - J_2$$

Le système triphasé est équilibré : $I_1 = I_2 = I_3 = I$ et $J_1 = J_2 = J_3 = J$.

Pour le couplage triangle, la relation entre **I** et **J** est la même que la relation entre V et U.

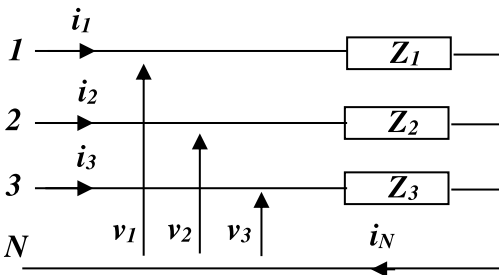
Pour le couplage triangle : **$I = \dots J$**

4 Récepteurs triphasés déséquilibrés

Un récepteur est non équilibré s'il est constitué de trois impédances différentes Z_1, Z_2 et Z_3 , couplées en étoile ou en triangle.

41. Couplage étoile avec neutre

On détermine la somme des trois courants en ligne, c'est à dire le courant dans le neutre, dans la charge étoile déséquilibrée :



$$I_N = I_1 + I_2 + I_3 = \frac{V_1}{Z_1} + \frac{V_2}{Z_2} + \frac{V_3}{Z_3}$$

**Cette somme n'est plus nécessairement nulle :
Un courant circule dans le conducteur de neutre.**

42. Couplage triangle

On détermine les courants I_1, I_2 et I_3 à partir des courants J_1, J_2 et J_3 calculés par :

$$i_1 = j_1 - j_3 \Rightarrow I_1 = J_1 - J_3$$

$$i_2 = j_2 - j_1 \Rightarrow I_2 = J_2 - J_1$$

$$i_3 = j_3 - j_2 \Rightarrow I_3 = J_3 - J_2$$

La relation $I = \sqrt{3} J$ n'est plus car le système est déséquilibré.

5 Puissances en triphasé

51. Charge triphasée déséquilibrée (ou quelconque)

Donc d'après le **théorème de Boucherot**, les puissances active et réactive absorbées par le récepteur est la somme des puissances véhiculées par chaque phase : $P = P_1 + P_2 + P_3$ et $Q = Q_1 + Q_2 + Q_3$

	Charge couplée en étoile	Charge couplée en triangle
Puissance active	$P = V_1.I_1.\cos \varphi_1 + V_2.I_2.\cos \varphi_2 + V_3.I_3.\cos \varphi_3$	$P = U_{12}.j_1.\cos \varphi_1 + U_{23}.j_2.\cos \varphi_2 + U_{31}.j_3.\cos \varphi_3$
Puissance réactive	$Q = V_1.I_1.\sin \varphi_1 + V_2.I_2.\sin \varphi_2 + V_3.I_3.\sin \varphi_3$	$Q = U_{12}.j_1.\sin \varphi_1 + U_{23}.j_2.\sin \varphi_2 + U_{31}.j_3.\sin \varphi_3$

52. Charge triphasée équilibrée

Si la charge est équilibrée, les trois impédances sont identiques, donc :

$$\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_3 = \varphi ; V_1 = V_2 = V_3 = V ; U_{12} = U_{23} = U_{31} = U ; j_1 = j_2 = j_3 = j \text{ et } I_1 = I_2 = I_3 = I.$$

	Charge couplée en étoile	Charge couplée en triangle
Puissance active	$P = 3VI\cos\varphi = 3\frac{U}{\sqrt{3}}I\cos\varphi = \sqrt{3}UI\cos\varphi$	$P = 3Uj\cos\varphi = 3U\frac{I}{\sqrt{3}}\cos\varphi = \sqrt{3}UI\cos\varphi$
Puissance réactive	$Q = 3VI\sin\varphi = 3\frac{U}{\sqrt{3}}I\sin\varphi = \sqrt{3}UI\sin\varphi$	$Q = 3Uj\sin\varphi = 3U\frac{I}{\sqrt{3}}\sin\varphi = \sqrt{3}UI\sin\varphi$

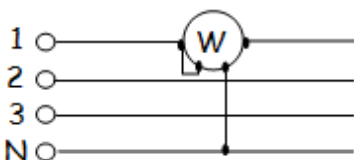
En résumé, la puissance peut toujours être exprimée de la même manière avec les grandeurs en tête de réseau, **tension composée U** et **courant en ligne I** et ceci quel que soit le type de montage.

$P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos\varphi$	$Q = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \sin\varphi$	$S = \sqrt{3} \cdot U \cdot I$
--	--	--------------------------------

53. Mesure de puissance en triphasé

Ligne à 4 fils

Circuit équilibré.

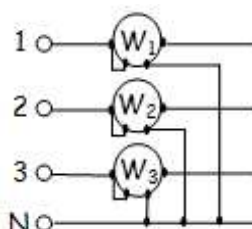


Il suffit de mesurer la puissance consommée par une phase et de multiplier par trois.

Un seul Wattmètre est nécessaire :

$$P = \dots\dots\dots$$

Circuit déséquilibré.



Il faut mesurer les puissances consommées par les trois phases et les additionner.

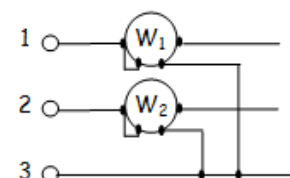
Trois wattmètres sont nécessaires :

$$P = \dots\dots\dots$$

Ligne à 3 fils

Méthode des deux Wattmètres

Circuit équilibré ou déséquilibré



Le montage des deux wattmètres est utilisé que le système soit équilibré ou non. (La seule condition est qu'il n'y ait pas de fil neutre).

$$P = \dots\dots\dots$$

Cas particulier de la méthode des deux Wattmètres

Le montage des deux wattmètres en régime équilibré :

Les indications des wattmètres donnent :

$$P_{13} = U_{13}I_1 \cos(\vec{I}_1, \vec{U}_{13}) = UI \cos(\varphi - \pi/6)$$

$$P_{23} = U_{23}I_2 \cos(\vec{I}_2, \vec{U}_{23}) = UI \cos(\varphi + \pi/6)$$

Dans ce cas particulier on peut vérifier directement que :

$$P_{13} + P_{23} = UI [\cos(\varphi - \pi/6) + \cos(\varphi + \pi/6)]$$

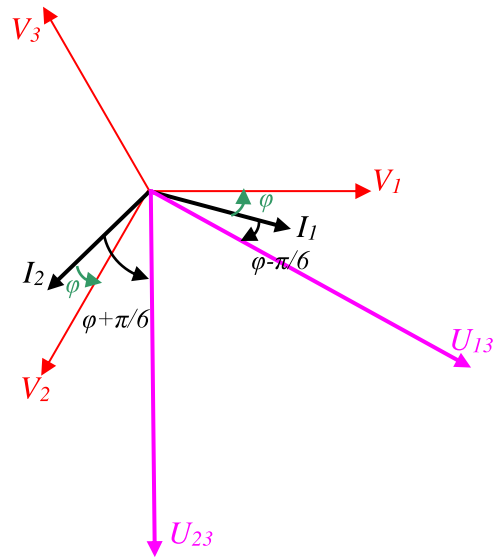
$$P_{13} + P_{23} = UI [2 \cdot \cos \varphi \cdot \cos \pi/6] = \sqrt{3} UI \cos \varphi$$

$$P_{13} + P_{23} = P$$

$$P_{13} - P_{23} = UI [\cos(\varphi - \pi/6) - \cos(\varphi + \pi/6)]$$

$$P_{13} - P_{23} = UI [2 \cdot \sin \varphi \cdot \sin \pi/6] = UI \sin \varphi = Q/\sqrt{3}$$

$$\text{Donc } Q = \sqrt{3}(P_{13} - P_{23})$$



En régime équilibré, la méthode des deux wattmètres fournit donc des renseignements précis sur le système étudié :

$P = \dots\dots\dots$ $Q = \dots\dots\dots$ $\tan \varphi = \dots\dots\dots$
--

Où P_{13} et P_{23} sont algébriques

P_{13} et P_{23} considérées séparément n'ont toujours aucun rapport avec la puissance dissipée dans une phase, mais on peut tout de même tirer quelques renseignements dans certains cas particuliers :

- Charge résistive : $\varphi = 0 \rightarrow \cos \varphi = 1 \implies P_{13} = P_{23}$
- Charge inductive: $0 < \varphi \leq \pi/2 \rightarrow 0 \leq \cos \varphi < 1 \implies P_{13} > P_{23}$
- Charge capacitive : $-\pi/2 \leq \varphi < 0 \rightarrow 0 \leq \cos \varphi < 1 \implies P_{23} > P_{13}$

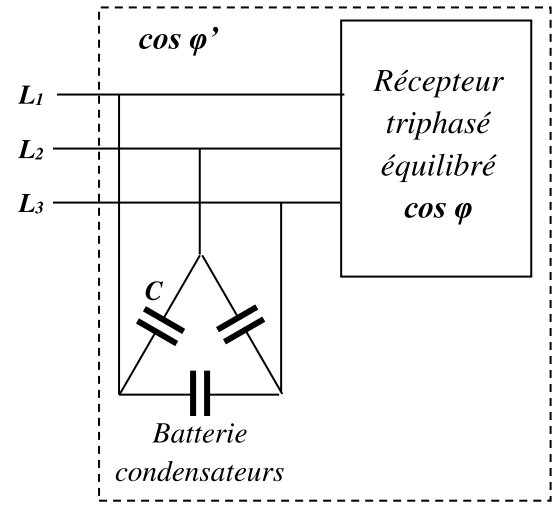
6 Amélioration du facteur de puissance "cos phi"

6.1. Pourquoi améliorer le facteur de puissance

Un facteur de puissance faible pour une installation électrique entraîne :

- Une puissance apparente $S = \frac{P}{\cos \varphi}$ plus élevée
 - Une consommation de l'énergie réactive $Q = \sqrt{S^2 - P^2}$
- Inconvénients :**
- Une consommation d'énergie plus importante, l'intensité en ligne est plus élevée d'où une perte d'énergie en ligne.
 - Des sections de conducteurs plus importantes.

Moyen utilisé pour relever le facteur de puissance :
 On utilise une batterie de condensateurs sources d'énergie réactive que l'on raccorde aux bornes du récepteur ou de l'installation à compenser.



62. Calcul de la capacité des condensateurs de compensation

Couplage des condensateurs en triangle

Tension aux bornes d'un condensateur : U

Puissance réactive absorbée par un condensateur : $Q_{C1} = \dots\dots\dots$

(Signe – signifie que C fournit de la puissance réactive)

Puissance réactive absorbée par les trois condensateurs : $Q_C = 3Q_{C1} = \dots\dots\dots$

Détermination de la capacité

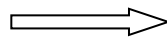
	Puissance active	Puissance réactive	Facteur de puissance
Charge seule	P	$Q = P.tan \varphi$	On a $cos \varphi$
Batterie condensateurs	0	$Q_C = - 3.C.\omega.U^2$	0
Charge + condensateurs	P	$Q' = Q + Q_C = P.tan \varphi' (I)$	On veut $cos \varphi'$

On en déduit la capacité du condensateur de la manière suivante:

La relation (I) donne : $Q_C = - 3C.\omega.U^2 = Q' - Q$

$$- 3C.\omega.U^2 = P.tan \varphi' - P.tan \varphi$$

$$3C.\omega.U^2 = P (\dots\dots\dots - \dots\dots\dots)$$



Finalemment :

$$C_A = \frac{\dots\dots\dots}{\dots\dots\dots}$$

Couplage des condensateurs en étoile

En utilisant le même raisonnement que précédemment, on montre que la capacité du condensateur est donnée par la relation :

$$C_Y = \frac{\dots\dots\dots}{\dots\dots\dots} = \frac{\dots\dots\dots}{\dots\dots\dots} = \dots\dots\dots$$

Conclusion

Le couplage en étoile est donc **moins intéressant** puisque la capacité des condensateurs nécessaires est **trois fois plus grande** que pour le couplage en triangle.

Plus la capacité est grande, plus le condensateur est volumineux et onéreux.

1 Introduction

11. Constitution du réseau national

Le réseau national est constitué de nombreuses centrales interconnectées entre elles pour assurer une bonne continuité de service et une grande stabilité de réseau. Ces centrales produisent en général du 20 kV qui est immédiatement élevé en 400 kV pour le réseau d'interconnexion.

A partir de ce réseau on abaisse la tension, par palier, pour alimenter des clients en 220 kV, 90 kV, 63 kV, 20 kV ou 230/400 V.

12. Domaines de tension

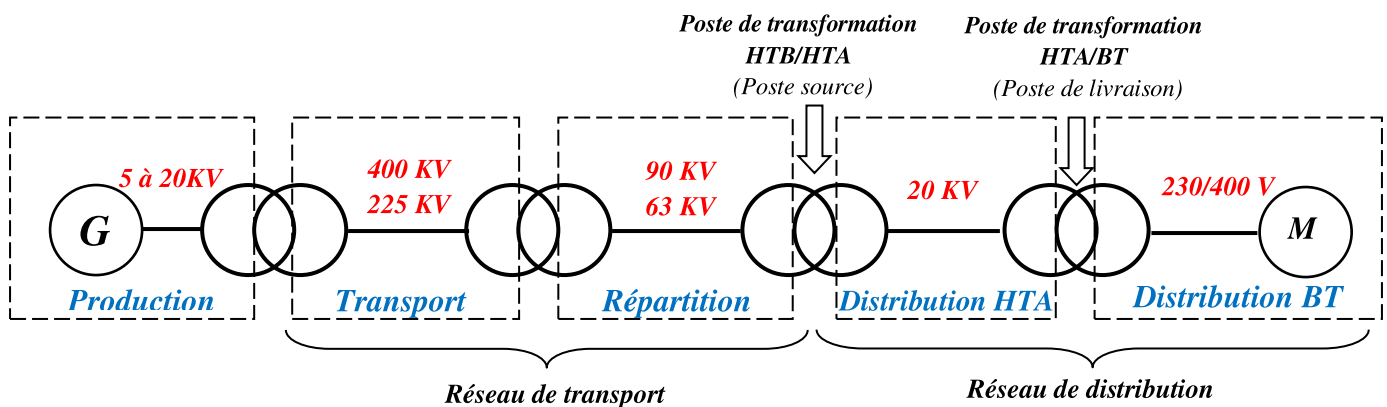
Il existe quatre catégories de tension, selon la dénomination on a :

Ancienne dénomination		Nouvelle dénomination	
Type de ligne	Tension alternative	Domaine	Tension alternative
Très Haute Tension (THT)	400 KV ou 225 KV	Haute Tension B (HTB)	$> 50\ 000\ V$
Haute Tension (HT)	90 KV ou 63 KV	Haute Tension A (HTA)	$1\ KV < U < 50\ KV$
Moyenne Tension (MT)	30 KV, 20 KV ou 15 KV	Basse Tension B (BTB)	$500\ V < U < 1000\ V$
Basse Tension (BT)	400 V, 230 V	Basse Tension A (BTA)	$50\ V < U < 500\ V$

2 Organisation du réseau de transport et de distribution

21. Principe de la distribution de l'énergie électrique

Le réseau de transport et de distribution est illustré comme ci-dessous :



22. Intérêt d'utiliser la Haute Tension pour le transport

L'avantage d'utiliser la **Haute Tension** est d'abaisser le courant en ligne et donc :

- Diminuer les pertes par effet Joule.
- Diminuer la section des conducteurs.

23. Lignes

L'énergie produite par les différents sites de production doit être acheminée sur tout le territoire. Cet acheminement est réalisé par des lignes **aériennes** ou **souterraines**.

Lignes aériennes

A haute et très haute tension, les lignes de transport sont aériennes dans leur grande majorité. Elles sont constituées de conducteurs nus en alliage d'aluminium et de supports (pylônes). Leur diamètre augmente avec la puissance à transporter.

Lignes Souterraines

Les liaisons souterraines nécessitent des câbles de fabrication plus complexe. Ils sont constitués d'une partie conductrice centrale en cuivre ou en aluminium, l'âme du câble, entourée d'une gaine isolante en matière synthétique.

Le recours aux liaisons souterraines s'impose surtout pour des raisons de sécurité ou d'esthétique.

24. Mouvements d'énergie

Il faut qu'à chaque instant la puissance demandée par les abonnés soit égale à la puissance fournie par ONE. Il faut aussi à chaque instant que l'énergie livrée soit :

- À une fréquence fixe ;
- À une tension fixe ;
- À une puissance variable.

Variation de la demande d'énergie

Au cours d'une journée de 24 heures, la consommation d'électricité suit l'activité du pays. Elle varie également en fonction des jours de la semaine et des saisons

Centres de répartition (Dispatching national)

Parce que l'électricité n'est pas stockable, le système électrique s'appuie sur le **Dispatching** afin d'ajuster la production à la demande.

Pour ce faire, le dispatching se base sur des prévisions de consommation journalière et ajuste en permanence les besoins théoriques aux besoins réels.



Nouveau **dispatching** national de Tit Mellil.

25. Postes d'interconnexion

Ils assurent la liaison entre les centrales de production d'énergie électrique et le réseau de transport et d'interconnexion. Des transformateurs de puissance permettent des échanges d'énergie entre réseaux et différentes tensions

3 Réseau de distribution d'énergie HTA/BT

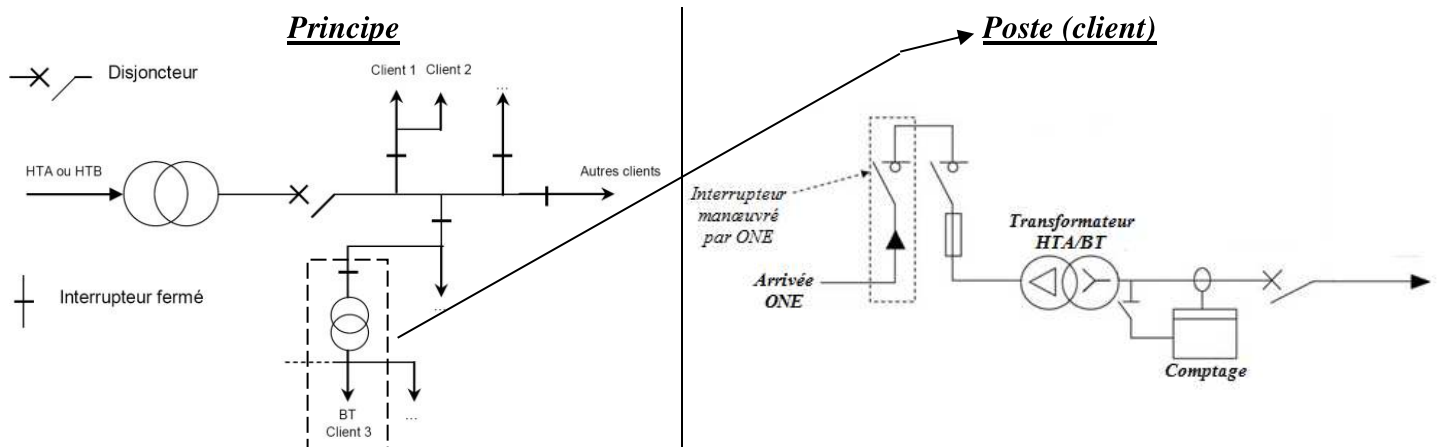
Une fois sur le réseau de distribution, l'électricité haute tension **HTA** alimente directement les clients industriels.

Pour les autres clients (particuliers, commerçants, artisans...), elle est convertie en basse tension (**BT**) par des postes de transformation avant d'être livrée.

31. Différents types de raccordement au réseau public de distribution d'électricité HTA

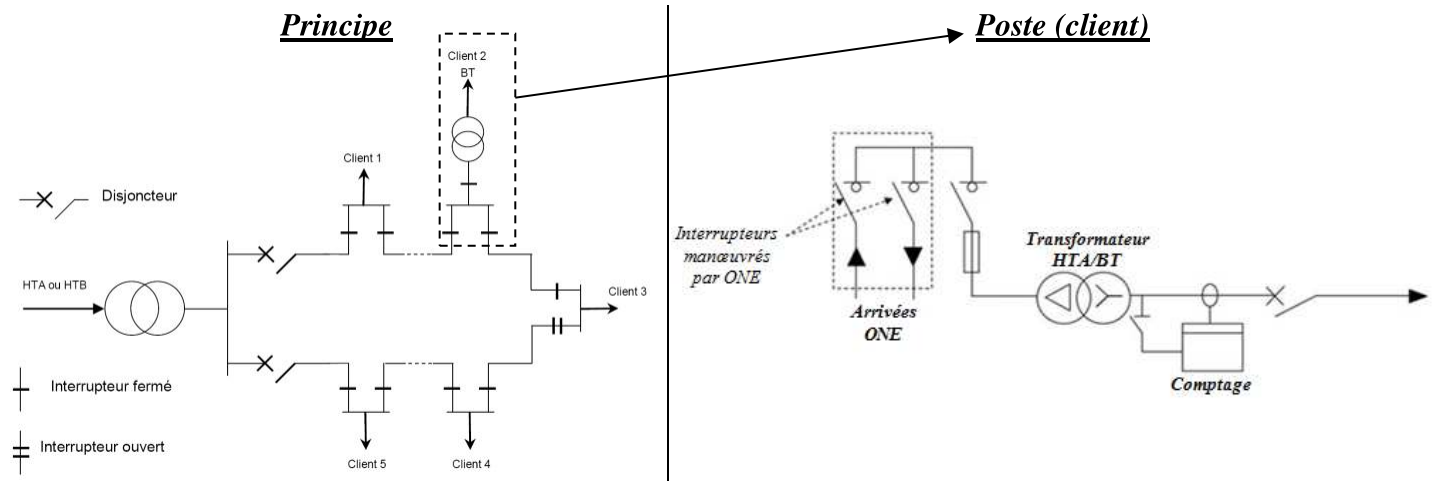
Selon le cas, l'alimentation peut être aérienne ou souterraine et elle s'effectue en simple dérivation, en boucle ouverte (coupure d'artère) ou en double dérivation.

Alimentation en antenne (ou simple dérivation) avec comptage en basse tension « BT »



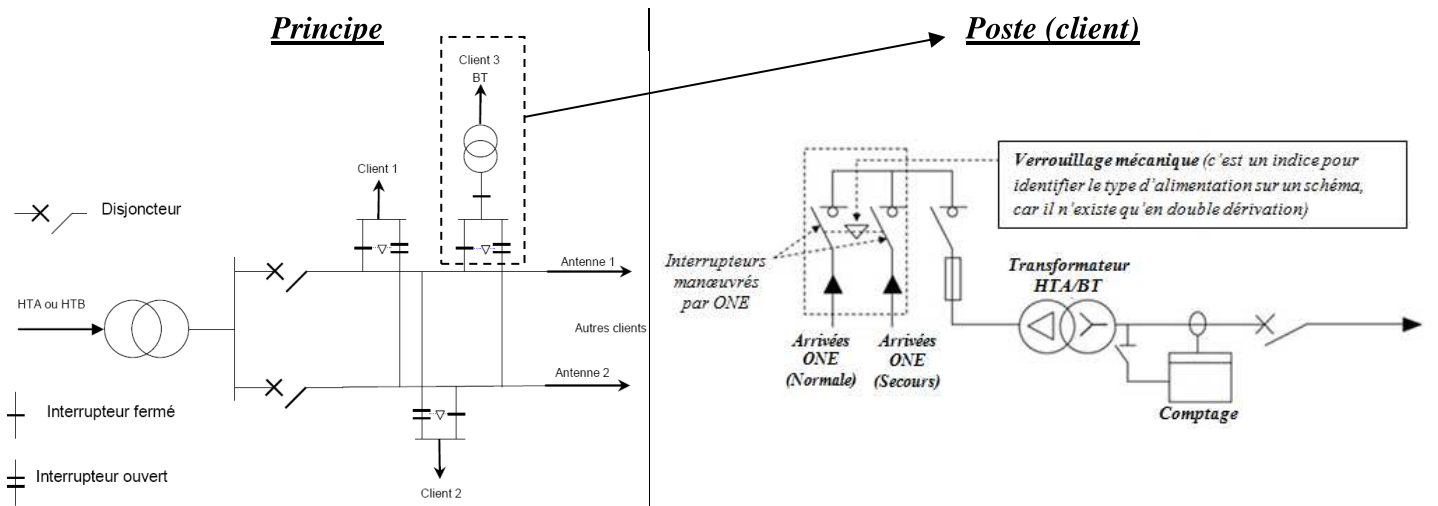
- **Fonction** : raccorder au réseau public de distribution le poste de livraison HTA/BT au moyen d'une seule canalisation électrique (ou une seule ligne d'arrivée).
- **Utilisation** : distribution rurale ou aux alentours des grandes villes en lignes aériennes.
- **Avantage** : coût minimal et simplicité d'utilisation.
- **Inconvénient** : pas de continuité de service (tout défaut provoque la coupure du poste HTA/BT).

Alimentation en coupure d'artère (ou boucle) avec comptage en basse tension « BT »



- **Fonction** : raccorder au réseau public de distribution le poste de livraison HTA/BT à partir d'une boucle ouverte en un point de coupure.
- **Utilisation** : distribution publique HTA urbaine en réseaux souterrains.
- **Avantage** : continuité de service.
- **Inconvénient** : coût élevé.

Raccordement en double dérivation avec comptage en basse tension « BT »



- **Fonction** : raccorder au réseau public de distribution le poste de livraison HTA/BT au moyen de deux lignes séparées, avec permutation automatique en cas de manque de tension sur l'une des deux arrivées.
- **Utilisation** : lorsque les exigences de disponibilité sont importantes notamment dans quelques grandes villes.
- **Avantage** : meilleure continuité de service (en cas de défaut, sur un poste ou un câble on passe automatiquement sur l'autre source).
- **Inconvénient** : coût élevé.

32. Poste de transformation HTA/BT

Un **poste de transformation** est un local, inaccessible au public, assurant la liaison entre le réseau haute tension (HTA) et le réseau basse tension (BT). Il est constitué de :

- Cellules d'arrivée qui dépendent de la nature de l'alimentation (antenne, boucle ou double dérivation).
- Cellules de comptage, dans le cas de comptage en HT.
- Cellules protection transformateurs.
- Cellules de départ ou cellules particulières (contacteur, commande de condensateurs, ...)

Poste de transformation HTA/BT.



Les cellules d'un poste HTA/BT

Cellules Raccordement au réseau			Cellules protection comptage		
Arrivée ou départ par interrupteur (IM)	Avec interrupteur et TC (IMC)	Arrivée en double dérivation (DDM)	Avec interrupteur et fusibles (QM)	Disjoncteur et sectionneur (DMI)	Transformateur de tension (CM)

33. Différents types de poste de transformation HTA/BT

Le poste de transformation HTA/BT (ou poste HTA/BT) s'appelle aussi « poste de livraison ». On peut classer ces postes en deux catégories :

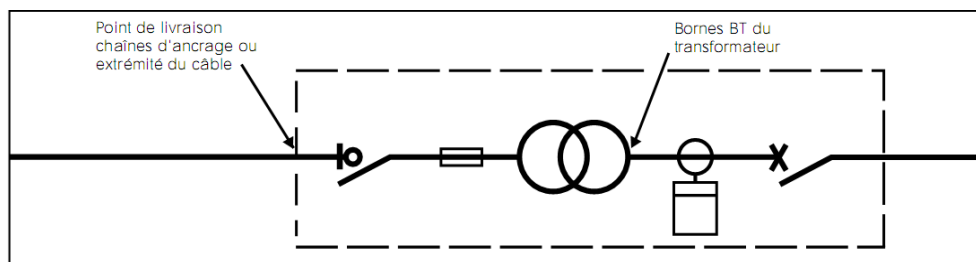
Les postes d'extérieur :

- Postes sur poteau (puissances 25-50-100 KVA) ;
- Postes préfabriqués (en bas de poteau 100 à 250 KVA) ;
- Postes compacts (60 à 1250 KVA) ;
- Postes maçonnés traditionnels (160 à 1250 KVA).

Les postes d'intérieur : postes ouverts maçonnés ou préfabriqués et postes en cellules préfabriquées métalliques (100 à 1250 KVA).

Poste à comptage BTA

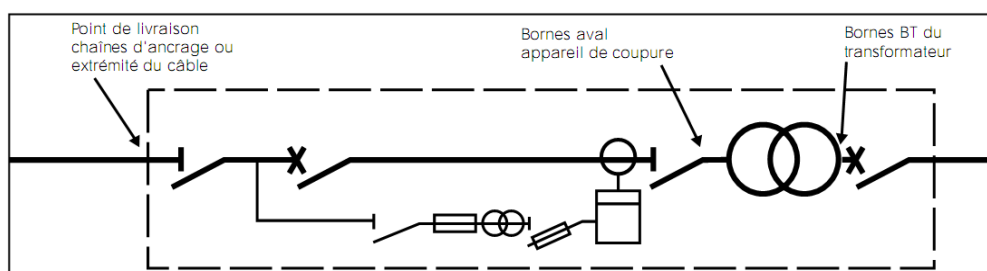
Le poste à comptage basse tension BTA est raccordé au réseau de distribution publique (20 kV) et ne comporte qu'un **seul transformateur** d'une puissance maximale de 1250 kVA.



Le comptage en basse tension nécessite un **transformateur de courant**, la tension est mesurée directement : comptage **peu coûteux**.

Poste à comptage HTA

Ce type de poste est utilisé généralement lorsque l'on a **plusieurs transformateurs**. Il peut être utilisé dans le cas d'un seul transformateur si sa puissance est **supérieure à 1250 KVA**.



Le comptage en haute tension nécessite un **transformateur de courant** et un **transformateur de tension** (adapter les grandeurs) : **comptage coûteux**.

4 Mesure et comptage

Les valeurs d'intensité et de tension à la sortie des transformateurs (TC et TP) sont l'image exacte des valeurs du réseau HTA. Ces images sont exploitées pour le comptage de l'énergie, les mesures de déphasages, de puissance, de courant, de tension. Elles sont aussi exploitées pour la protection des personnes et des biens.

41. Mesures électriques sur les réseaux

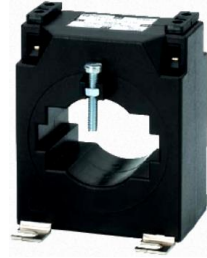
Les données en provenance des capteurs placés sur le réseau sont traitées par l'unité de protection et de contrôle qui commande les actionneurs sur le réseau.

Capteur de courant (TC)

Ce sont des transformateurs de courant. Ils permettent de :

- Adapter le courant à mesurer aux appareils de mesure.
- Isoler le circuit de puissance du circuit de mesure

Caractéristiques : Courant primaire : 10, 15, ..., 500 A
Courant secondaire : 1 à 5 A



Capteur de tension (TP)

Ce sont des transformateurs de tension et permettent de :

- Adapter la tension aux calibres des appareils de mesures
- Isoler le circuit de puissance des circuits de mesures

Caractéristiques :

Tension primaire : 3,5, 10, 20, 30 kV (HTA)

Tension secondaire : 100, 110 V (BT)

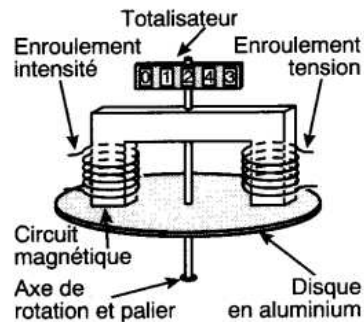


42. Comptage d'énergie

Le poste de comptage est en limite de propriété, il est constitué d'un compteur d'énergie enregistrant la consommation d'énergie.

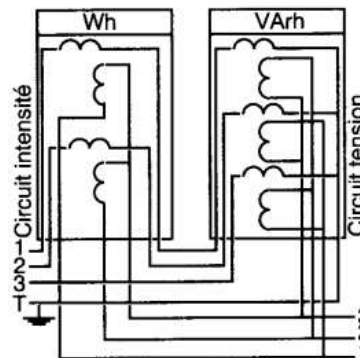
Compteur monophasé

Les compteurs d'énergie fonctionnent sur le principe des moteurs d'induction, et comportent des enroulements parcourus par l'intensité I et par la tension U . Le nombre de tours du disque est proportionnel à l'énergie consommée dans le circuit.



Compteur triphasé

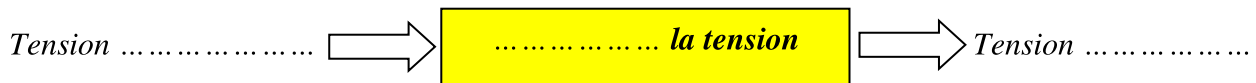
L'énergie active et l'énergie réactive sont mesurées selon les mêmes principes que les mesures de puissances actives et réactives en triphasé. Pour les intensités supérieures à 64 A, on dispose de transformateurs de courant



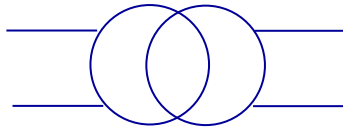
1 Transformateurs monophasés

11. Rôle

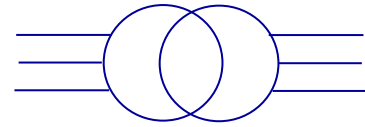
Les transformateurs sont utilisés pour adapter (élever ou abaisser) une tension aux besoins de l'utilisation.



12. Symbole

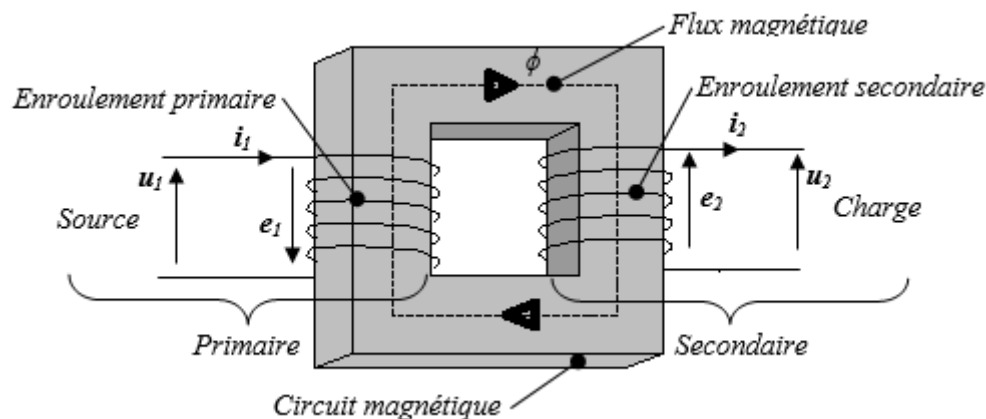


Transformateur monophasé



Transformateur triphasé

13. Constitution et principe de fonctionnement



Il est constitué de 2 enroulements placés sur un circuit magnétique fermé :

- **Le primaire** est alimenté par le (source) et se comporte comme un Il crée un champ et un flux magnétique ($\Phi(t)$ alternatif) dans le circuit magnétique feuilleté.
- **Le secondaire** est soumis à la variation de ce flux, il est le siège d'une f.é.m. (e_2) induite due à la loi de Lenz ($e = -N \frac{d\Phi}{dt}$), il se comporte comme un et alimente la charge.

Un transformateur qui produit une tension plus grande est dit de tension, à l'inverse il est dit de tension.

14. Transformateur parfait

Hypothèses simplificatrices

- Circuit magnétique fermé de perméabilité infinie (pas de fuites de flux et pas de pertes de fer).
- Enroulements primaire et secondaire de résistance nulle (pas de pertes par effet joule dans les enroulements).

Relations entre les tensions

A chaque instant, chaque spire est traversée par le même flux magnétique.

Au primaire

$$e_1 = -N_1 \frac{d\Phi}{dt} \quad \text{Donc } u_1 = -e_1 = N_1 \frac{d\Phi}{dt} \quad \text{En complexe : } \underline{U}_1 = - \dots = \dots \quad (1)$$

Au secondaire

$$e_2 = -N_2 \frac{d\Phi}{dt} \quad \text{Donc } u_2 = e_2 = -N_2 \frac{d\Phi}{dt} \quad \text{En complexe : } \underline{U}_2 = \dots = \dots \quad (2)$$

On tire immédiatement :
$$\frac{u_2}{u_1} = - \frac{e_2}{e_1} = - \frac{N_2}{N_1} = - m$$

Cette relation (signe -) indique que les tensions u_1 et u_2 sont en opposition de phase.

La relation entre les valeurs efficaces U_1 et U_2 ne tient pas compte du déphasage : $m = \dots = \dots$

m est le rapport de transformation du transformateur.

Formule de Boucherot

L'équation (I) $U_1 = j. \omega. N_1. \Phi$ donne en valeur efficace :

$$U_1 = \omega. N_1. \Phi = \omega. N_1. \frac{\Phi_{max}}{\sqrt{2}} = \dots = \dots$$

$$U_1 = 4,44.f. N_1.s.B_{max} \quad \text{et} \quad U_2 = 4,44.f.N_2 .s.B_{max} \quad \rightarrow \text{Formule de Boucherot}$$

Où U , E (valeurs efficaces en Volts (V)), B (champ magnétique en Tesla (T)), s (section de fer en (m²)) et f (fréquences en Hertz (Hz)).

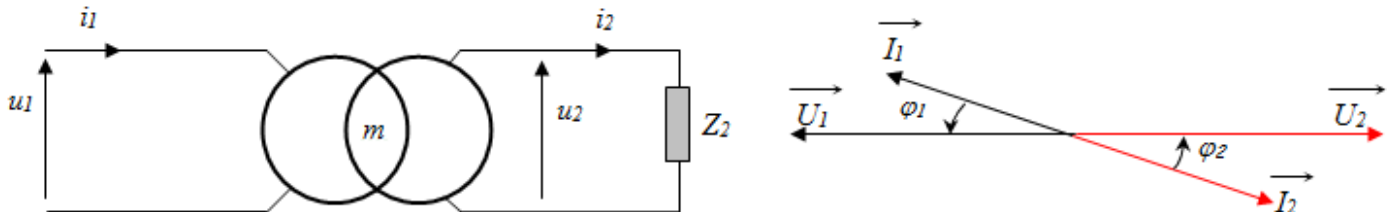
Relations entre les intensités

Bilan des puissances : $P_1 = P_2$ (transformateur parfait) soit le rendement est : $\eta = P_2/P_1 = 1$

Comme $\varphi_1 = \varphi_2$ (tensions et courants sont en opposition) on a : $S_1 = S_2 = U_1 I_1 = U_2 I_2 \Rightarrow m = \frac{U_2}{U_1} = \frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1}$

Schéma électrique équivalent et diagramme de Fresnel

Un transformateur parfait est alimenté au primaire par une tension sinusoïdale u_1 . Il alimente une charge Z_2 , telle que le courant i_2 présente un déphasage d'un angle φ_2 avec la tension u_2 .

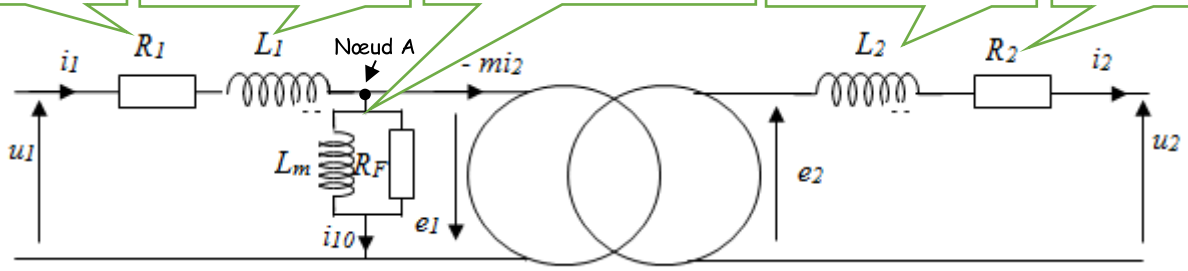


L'intensité du courant I_2 dépend de la charge appliquée au secondaire, il en est de même pour le facteur de puissance $\cos \varphi_2$. Ces deux grandeurs imposent l'intensité du courant I_1 appelé au primaire, ainsi que le facteur de puissance du primaire, sachant que $\varphi_1 = \varphi_2$.

15. Transformateur réel

En éliminant toutes les hypothèses précédentes :

- R_1 la résistance des fils de cuivre de l'enroulement primaire.
- L_1 l'inductance représentant les fuites magnétiques au primaire.
- R_F représente les pertes dans le fer. L_m l'inductance magnétisante créant le flux magnétique.
- L_2 l'inductance représentant les fuites magnétiques au secondaire.
- R_2 la résistance des fils de cuivre de l'enroulement secondaire.



Relations entre les tensions

Le circuit du primaire peut se mettre en équation comme suit : $U_1 = - E_1 + R_1.I_1 + j L_1 \omega.I_1$

Le circuit du secondaire peut se mettre en équation comme suit : $U_2 = E_2 - R_2.I_2 - j L_2 \omega.I_2$

Relations entre les intensités

La loi des nœuds en A s'écrit : $i_1 = i_{10} - \frac{N_2}{N_1} i_2 = i_{10} - m i_2$

Avec i_{10} , intensité du courant absorbé par le primaire du transformateur à vide.

Comportement simplifié dans l'hypothèse de Kapp

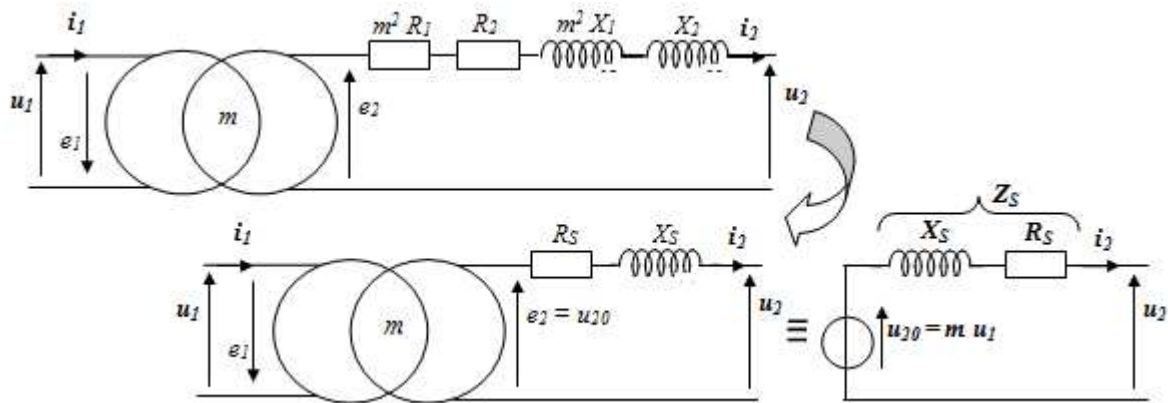
L'hypothèse de Kapp permet de négliger le courant i_{10} vis à vis de i_1 si bien que i_1 et i_2 sont dans le rapport de transformation.

Schéma équivalent simplifié ramené au secondaire

Le modèle de Thévenin équivalent au transformateur vu du secondaire consiste à ramener tous les éléments du transformateur sur le circuit du secondaire.

Connaissant la charge, il sera aisé de calculer les paramètres électriques du transformateur complet.

Les éléments R_1 et $X_1 = L_1 \cdot \omega$ peuvent être déplacés au secondaire en les multipliant par m^2 , ainsi :



Le secondaire se comporte comme une source de :

- Tension : =
- Impédance : =

Avec : $R_S = (R_2 + m^2 R_1)$ et $X_S = (X_2 + m^2 X_1)$

On peut écrire l'équation du transformateur ramenée au secondaire : $U_2 = U_{20} - (R_S + jX_S) I_2$

En valeur efficace : $U_2 = U_{20} - \Delta U_2$ avec ΔU_2 valeur approché de la chute de tension au secondaire.

Calcul approché de la chute de tension au secondaire ΔU_2

Le calcul de la chute de tension peut être alors réalisé à l'aide d'une formule approchée :

$\Delta U_2 = \dots\dots\dots$

Détermination des éléments R_S et X_S

A partir de ces deux essais: essai à vide et essai en court-circuit

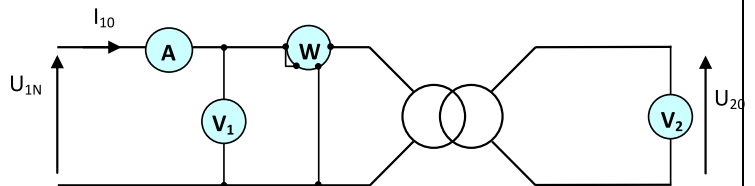
Essai à vide

Pour $U_1 = U_{1N}$, on mesure U_{20} et P_{10} . On calcule : le rapport de transformation du transformateur

On tire : $m = \frac{\dots\dots}{\dots\dots}$

Puisque I_{10} est très faible donc $P_{J10} \ll P_{10}$.

Enfinement : essai à vide $P_{10} = \dots\dots\dots$

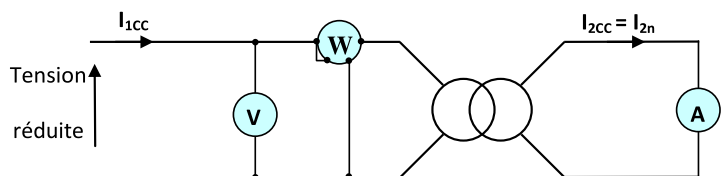


Essai en court-circuit

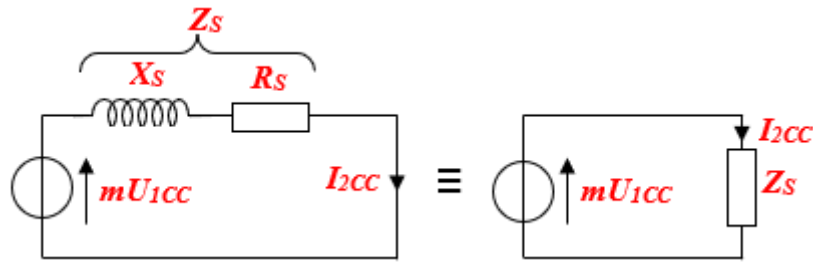
Cet essai doit être réalisé sous tension réduite

U_{1CC} (sinon destruction du transformateur)

Pour $I_{2cc} = I_{2n}$, on mesure : U_{1CC} et P_{1CC}



En utilisant le modèle équivalent au transformateur vu du secondaire en court-circuit ci-dessous :



Toute la puissance P_{1cc} consommée lors de cet essai est dissipée dans la résistance R_s (puissance active) :

$P_{1cc} = R_s \cdot I_{2cc}^2$ On calcule alors : $R_s = \dots\dots\dots$ et $Z_s = \frac{\dots\dots\dots}{\dots\dots}$ soit $X_s = \dots\dots\dots\dots\dots\dots$

Rendement du transformateur

Le rendement d'un appareil est le rapport de la puissance restituée à la puissance fournie.

Méthode directe

Cette méthode consiste à mesurer avec deux wattmètres P_1 et P_2 . Soit le rendement : $\eta = \frac{P_2}{P_1}$

Méthode indirecte ou méthode des pertes séparées

Cette méthode consiste à évaluer les différentes pertes dans les conditions nominales d'utilisation.

Soit : $\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{U_2 \cdot I_2 \cdot \cos\phi_2}{\dots\dots\dots\dots\dots\dots}$

Remarque : le rendement est **maximal** lorsque pertes fer et pertes cuivre sont **identiques**.

2 Transformateurs triphasés

Dans le transport et la distribution de l'énergie électrique, on utilise des transformateurs triphasés de grande puissance. Ils sont installés dans :

- Les centrales ;
- Les postes d'interconnexion ;
- Les postes de distribution ;
- Sur les poteaux ;

On peut considérer dans le principe de fonctionnement qu'un transformateur triphasé est équivalent à **trois transformateurs monophasés**.

La différence tient essentiellement **aux modes de couplage des enroulements** des transformateurs triphasés.

21. Exemple de transformateurs

Transformateur de type immergé



Transformateur de type sec enrobé



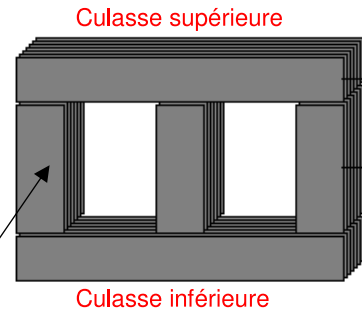
22. Constitution

Circuit magnétique

Le circuit magnétique canalise le flux magnétique. Il est constitué d'un empilage de tôles. Ces tôles sont :

- Isolées entre elles par oxydation (diminutions des pertes par courant de Foucault) ;
- À cristaux orientés (diminution des pertes par hystérésis) ;
- Assemblées en alterné pour limiter l'entrefer (réductions des fuites magnétiques).

Colonne ou noyau



Circuit électrique

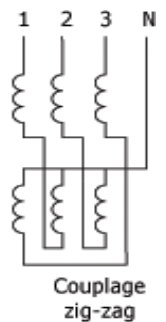
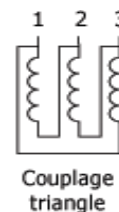
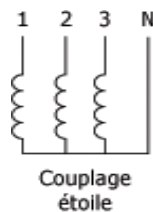
Il comprend les enroulements primaires et secondaires ainsi que les éléments permettant les connexions avec les circuits extérieurs.

Pour les transformateurs triphasés, il y a 3 enroulements primaires et 3 enroulements secondaires.



23. Couplage des enroulements

Comme tous les récepteurs triphasés, le primaire d'un transformateur peut avoir ses enroulements couplés en étoile ou en triangle. De la même façon, les bobines secondaires pourront être connectées en étoile, en triangle ou en zig-zag.

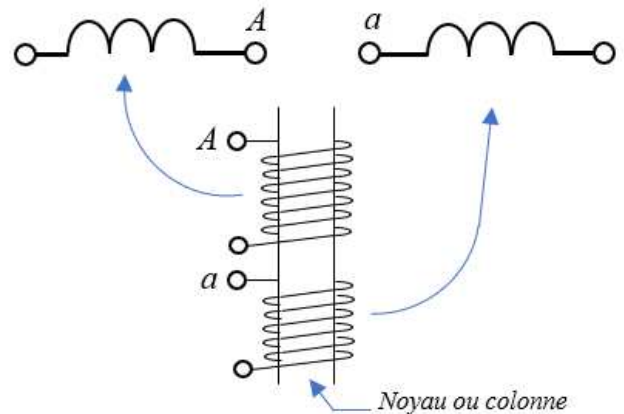


24. Représentation symbolique

On représente sur un même axe les enroulements situés sur une même colonne, c'est-à-dire les bobines d'un transformateur monophasé élémentaire.

Par convention :

- Les bornes haute tension (**primaire**) sont repérées par des lettres majuscules : **A, B, C**.
- Les bornes basse tension (**secondaire**) sont repérées par des lettres minuscules : **a, b, c**.



25. Désignation d'un transformateur triphasé

1 ^{ère} lettre (majuscule) Couplage primaire			2 ^{ème} lettre (minuscule) Couplage secondaire			3 ^{ème} lettre neutre sorti	Indice horaire
Etoile	Triangle	Zig-zag	Etoile	Triangle	Zig-zag		
.....	N ou n	0, 1, 2, ... 11

Exemple : Dyn1

26. Rapport de transformation

Par définition : $M = \frac{U_{ab0}}{U_{AB}}$

Ce rapport dépend non seulement des nombres de spires primaires et secondaires, mais aussi des couplages au primaire et au secondaire.

Yy et Dd	Yd	Dy et Yz	Dz
$M = \dots\dots$	$M = \dots\dots$	$M = \dots\dots$	$M = \dots\dots$

27. Indice horaire

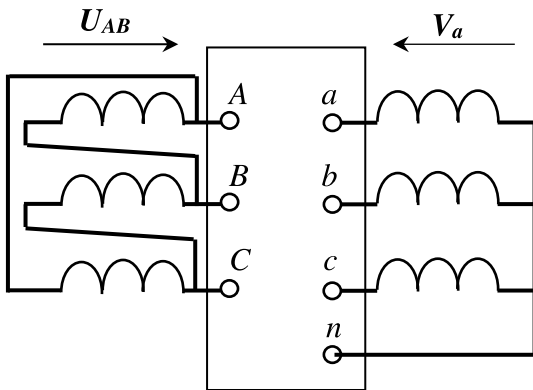
Les conditions de couplage des enroulements primaires et secondaires ont aussi pour effet d'introduire un déphasage entre des tensions primaires et secondaires homologues, c'est à dire apparaissant entre les bornes désignées par des mêmes lettres (V_A, V_a) ou (U_{AB}, U_{ab}).

En pratique, le déphasage θ obtenu est toujours un multiple entier de 30° .

$\theta = \text{retard d'une tension BT sur son homologue HT.}$

L'indice horaire I est : $I = \theta/30^\circ \quad 0 \leq I \leq 11$ (entier)

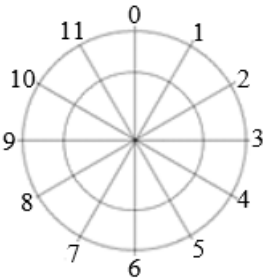
Détermination de l'indice horaire à partir du schéma de couplage du transformateur



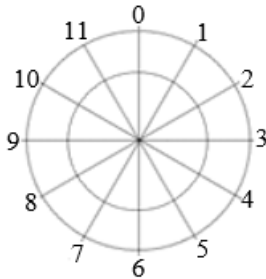
Les tensions aux bornes des enroulements primaire et secondaire d'une colonne sont en phase.
Donc U_{AB} et V_a sont en phase.

Méthode pour déterminer l'indice horaire du transformateur est

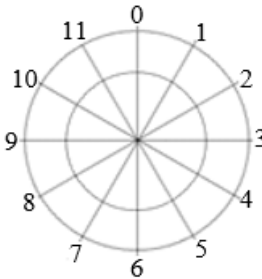
On pose le vecteur tension V_A verticalement (HT) puis les tensions V_B et V_C .



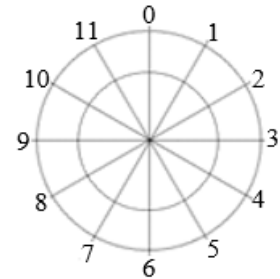
On dessine le triangle représentant le couplage au primaire.



On désigne le vecteur tension U_{AB} .



On pose le vecteur tension V_a parallèle au vecteur U_{AB} car les tensions V_a et U_{AB} sont en phase (même colonne).



$\theta = \dots\dots\dots$ Soit $I = \dots\dots\dots$ Ou bien les vecteurs V_a et V_A (analogie à une montre) donnent $\dots\dots\dots$

Donc la désignation de ce transformateur est $\dots\dots\dots$

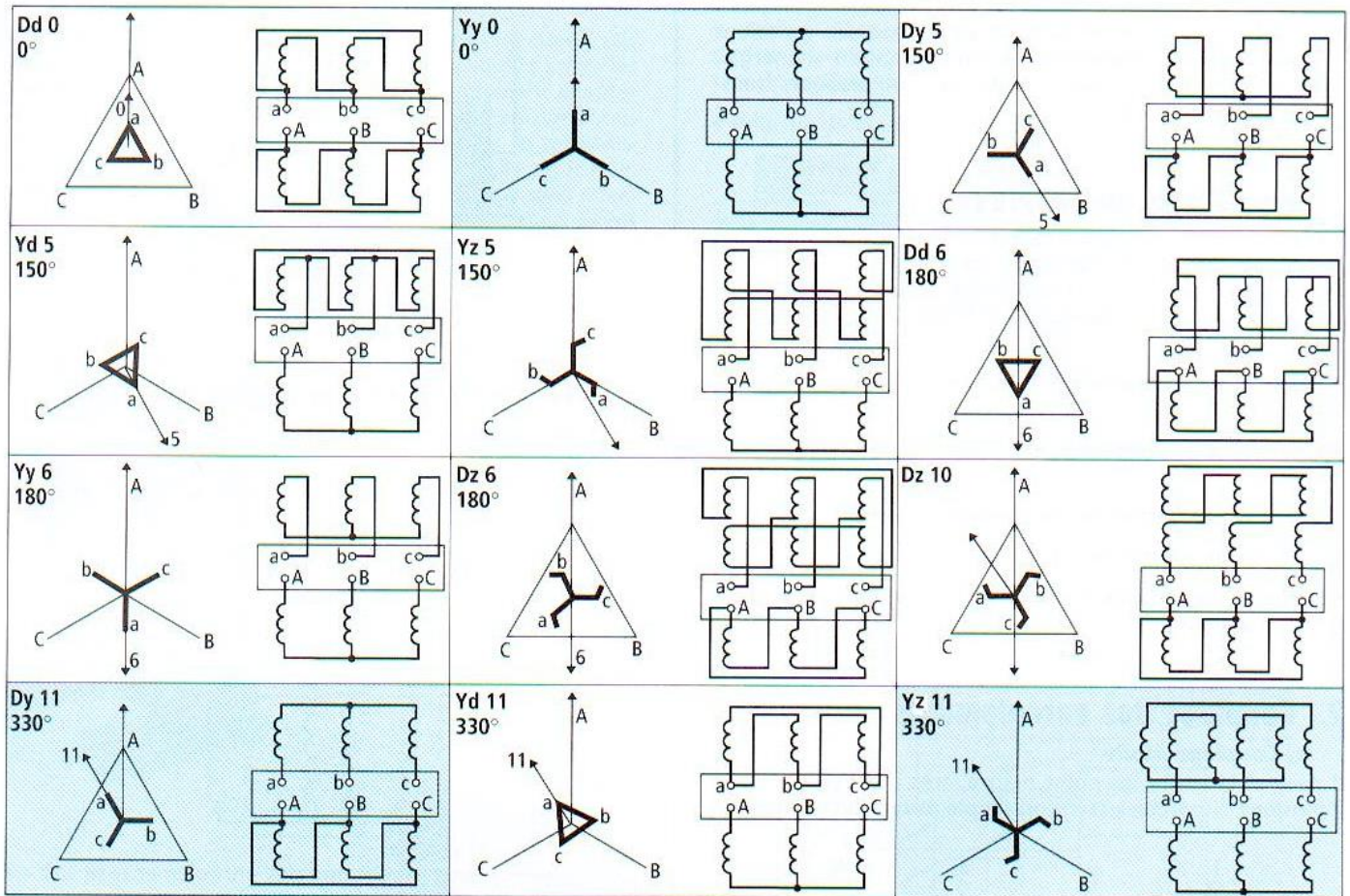
28. Caractéristiques d'un transformateur triphasé

La plaque signalétique d'un transformateur donne les principales caractéristiques électriques :

- La puissance assignée (en KVA).
- Les tensions primaire et secondaire assignées (en V ou KV).
- Les courants primaire et secondaire assignés (en A ou KA).
- La fréquence d'emploi (50 Hz).
- Les couplages côtés HT et BT.
- L'indice horaire.
- La tension de court-circuit (pourcentage de la tension primaire assignée pour obtenir le courant nominal au secondaire, lorsque le secondaire est en court-circuit).
- Le mode de refroidissement.

Couplages normalisés

TABLEAUX DES PRINCIPAUX COUPLAGES



29. Couplage en parallèle des transformateurs

La mise en marche en parallèle de transformateurs peut être nécessaire afin de répondre à l'augmentation de la demande de la puissance à fournir.

Les **conditions de mise en parallèle** des transformateurs sont les suivantes :

- Alimentation des 2 transformateurs par le **même réseau**.
- Même **rapport de transformation**.
- Connexions de même longueur en BT.
- **Mêmes indices horaires ou indices compatibles**.
- Rapport de puissance au plus égal à 2
- Les tensions de court-circuit égales à 10 % près.

Groupes d'indices horaires

En pratique, on peut aisément modifier l'indice horaire d'un transformateur en effectuant une permutation circulaire des lettres affectées aux bornes : toute permutation correspond à une augmentation ou à une diminution de 4 de la valeur de l'indice horaire.

Groupe	Indices	Couplages
I	0, 4, 8	Yy – Dd - Dz
II	2, 6, 10	Yy – Dd - Dz
III	1, 5	Dy – Yz - Yd
IV	7, 11	Dy – Yz - Yd

Exemple :

Mise en parallèle de deux transformateurs de groupe d'indices horaires compatibles :

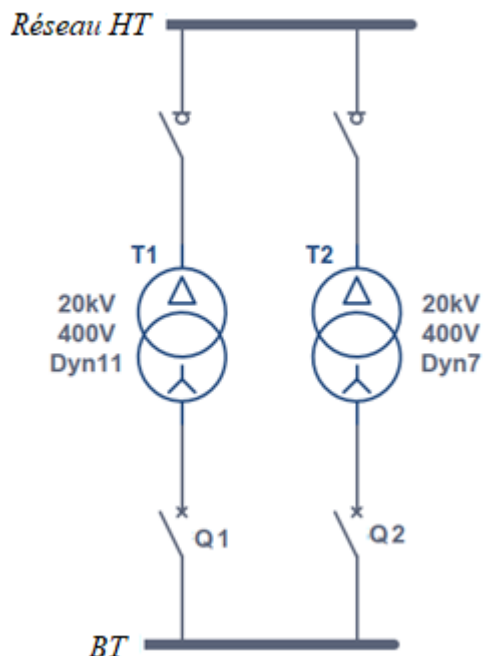


Schéma de branchement des bornes des 2 transformateurs :

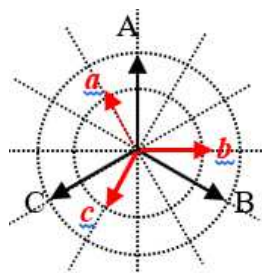


Diagramme vectoriel des tensions du T1

Réseau HT

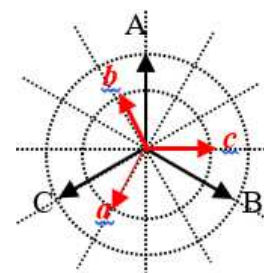
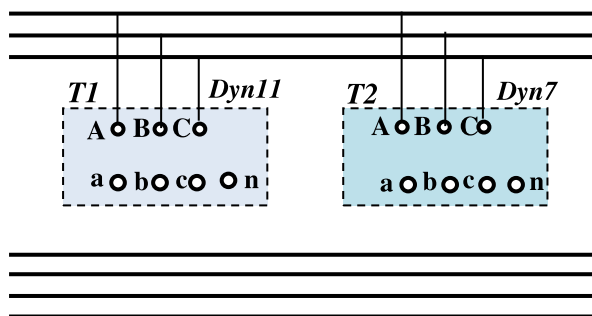


Diagramme vectoriel des tensions du T2

30. Modes de refroidissement des transformateurs

Il est nécessaire de refroidir les transformateurs de grosses puissances afin d'éviter la détérioration des isolants causée par les échauffements. (Pertes fer et pertes cuivre).

Différents types de refroidissement

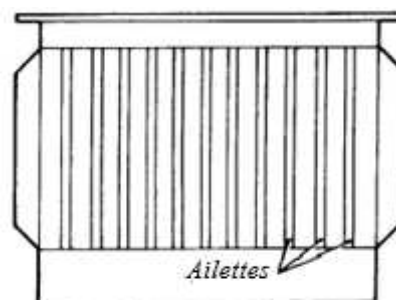
Ce refroidissement peut se faire de différentes façons :

Refroidissement dans l'air

Le transformateur est mis dans une enceinte grillagée, la ventilation peut être naturelle ou forcée (ventilateur).

Refroidissement naturel dans l'huile

Une cuve renferme le transformateur. Cette cuve est munie d'ailettes. L'huile se refroidit au contact des parois (échange thermique).



Forme des ailettes

Refroidissement par radiateur d'huile

L'huile circule naturellement dans un radiateur séparé de la cuve (figure 1). Ce radiateur peut être ventilé et la circulation d'huile forcée par une pompe qui en accélère le passage (figure 2).

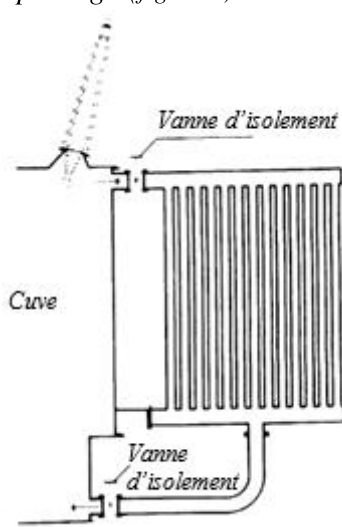


Figure 1

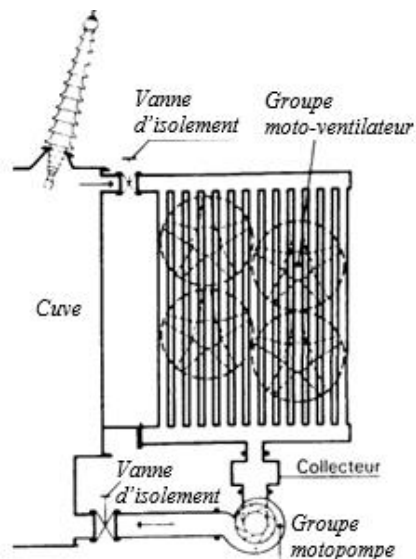
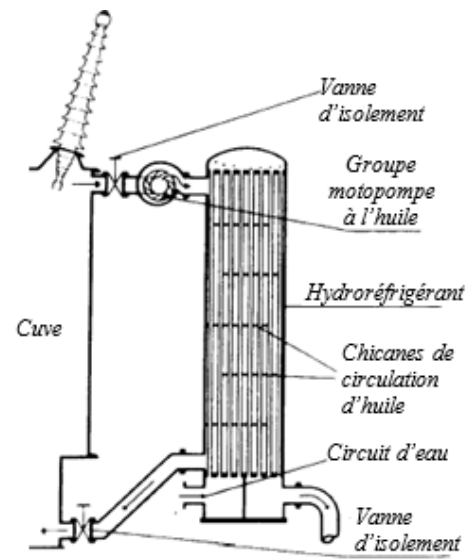


Figure 2

Refroidissement avec hydroréfrigérant

La circulation de l'huile s'effectue dans une cuve contenant des tubes à l'intérieur desquels circule de l'eau froide



Diélectrique

Le diélectrique assure le refroidissement et l'isolement des transformateurs. Selon les tensions appliquées aux enroulements, l'isolement peut être assuré par :

- **L'air**, c'est le cas des petits transformateurs en BT ;
- **L'huile minérale**, très employée dans tous les transformateurs de puissance, mais elle présente des risques d'incendies et d'explosion ;
- **Quartz**, c'est un sable qui étouffe les flammes mais rend le refroidissement plus difficile.

Le système de refroidissement est caractérisé par un **code de quatre lettres** :

1 ^{ère} lettre	2 ^{ème} lettre	3 ^{ème} lettre	4 ^{ème} lettre
Fluide de refroidissement interne	Mode de circulation du fluide de refroidissement interne	Fluide de refroidissement externe Symbole comme 1 ^{ère} lettre	Mode de circulation du fluide de refroidissement externe Symbole comme 2 ^{ème} lettre
O : huile minérale L : diélectrique chloré G : gaz A : air S : isolant solide	N : naturel F : forcée D : forcée et dirigée dans les enroulements	O : huile minérale L : diélectrique chloré G : gaz A : air S : isolant solide W : Eau	N : naturel F : forcée D : forcée et dirigée dans les enroulements

Exemple

ONAN : signifie transformateur immergé dans **l'huile**, à circulation **naturelle**, refroidi par **l'air**, à ventilation **naturelle**.

L'utilisation de l'énergie électrique présente des risques tant pour les personnes que pour les matériels.

1 Protection des personnes : régimes de neutre

11. Nécessité de la liaison à la terre

L'énergie électrique demeure dangereuse et la majorité des accidents est due aux défauts des récepteurs (contacts indirects).

La masse (partie métallique) des récepteurs doit donc être reliée à la terre pour assurer une tension de contact la plus possible. Quelle que soit la cause de ces défauts, ils présentent des risques pour :

- La vie des personnes ;
- La conservation des biens ;
- La disponibilité de l'énergie électrique.

Pour la liaison à la terre, plusieurs solutions existent qui se trouvent dans la famille des Schémas de Liaison à la Terre (SLT) appelés aussi "régimes de neutre"

Tous assurent la sécurité des personnes contre les contacts indirects avec chacun des avantages et des inconvénients en fonction des besoins de l'utilisateur.

12. Les trois régimes de neutre

Chaque régime de neutre est identifié grâce à deux lettres :

1 ^{ère} lettre : Situation du neutre du transformateur par rapport à la terre		2 ^{ème} lettre : Situation des masses du récepteur par rapport à la terre ou au neutre	
T	Pour neutre raccordé à la terre.	T	Pour masse reliée à la terre.
I	Pour neutre isolé de la terre.	N	Pour masse reliée au neutre.

Les 3 régimes
---------------	-------	-------	-------

13. Régime TT

Les deux lettres qui définissent ce régime signifient :

- **T** : Le neutre du transformateur relié à la terre.
- **T** : Les masses métalliques reliées à la terre.

Ce régime est celui employé par Lydec pour les réseaux de distribution basse tension.

Boucle de Défaut

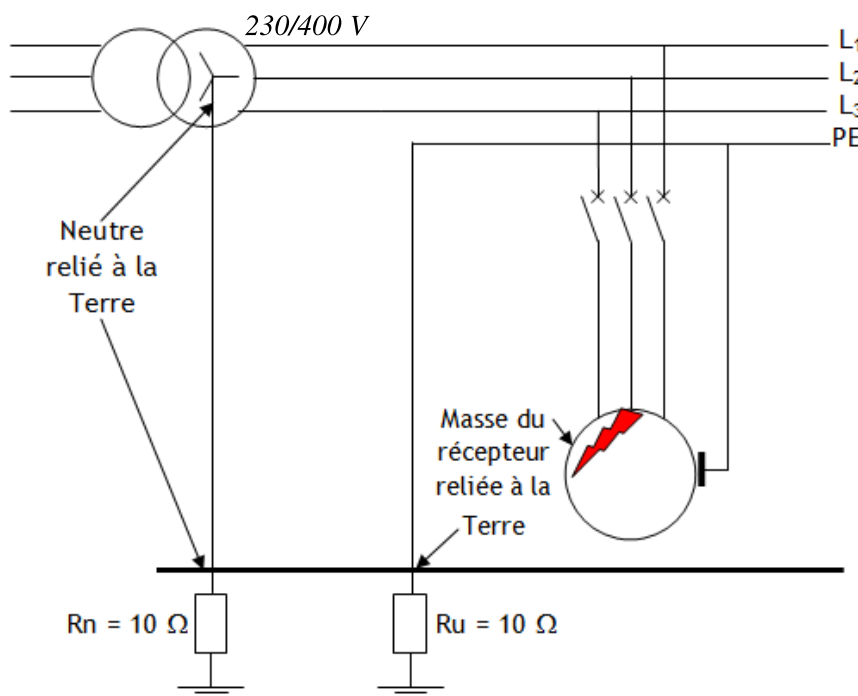
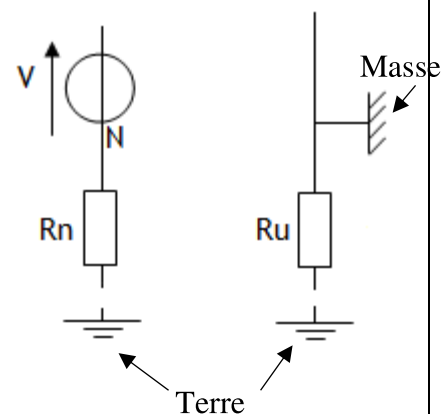


Schéma électrique du défaut



Danger potentiel et principe de protection

La résistance des câbles est négligeable devant celle de la prise de terre du neutre et des masses.

Courant de défaut

Lors d'un défaut d'isolement, un courant de défaut circule par la terre : $I_d = \frac{\dots}{\dots} = \frac{\dots}{\dots} = \dots$

Tension de contact

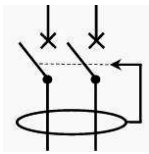
Une tension de contact apparaît entre les masses métalliques et le sol : $U_c = \dots = \dots = \dots$

Cette tension est potentiellement dangereuse car elle est supérieure à la tension limite de sécurité $U_L = 50 \text{ V}$.

⇒ La coupure de l'installation est dès l'apparition du défaut

Protection

Elle est assurée par un



La sensibilité $I_{\Delta N}$ de ce DDR dépend de la tension limite de sécurité U_L et de la résistance de la prise de terre R_u de l'installation : $I_{\Delta N} = \dots$

Une bonne prise de terre doit avoir la résistance la plus possible. Cette résistance dépend de la nature du sol

Toute installation **TT** doit être protégée par un dispositif différentiel résiduel placé à l'origine de l'installation.

Il faut vérifier que ce dispositif de protection réagit en un temps inférieur à celui imposé par la norme (temps de coupure maximal des DDR) :

Temps de coupure maximal des DDR (régime TT)	
Tension alternative de contact présumé	Temps de coupure maximal en (s)
$50\text{V} < U_0 \leq 120\text{V}$	0,3
$120\text{V} < U_0 \leq 230\text{V}$	0,2
$230\text{V} < U_0 \leq 400\text{V}$	0,07
$U_0 > 400\text{V}$	0,04

14. Régime TN

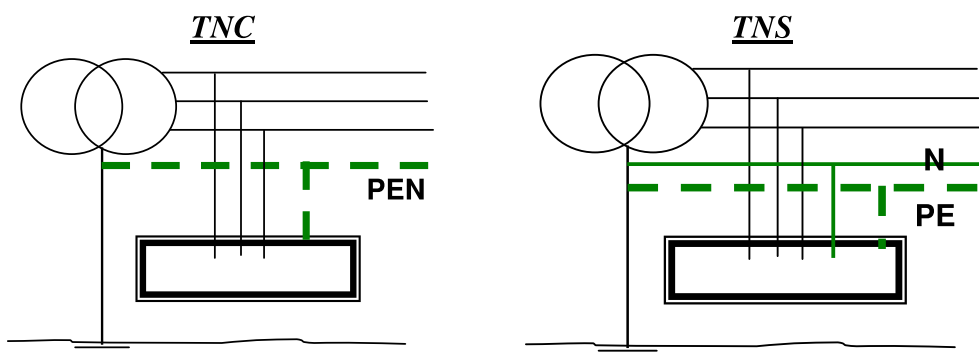
Les deux lettres qui définissent ce régime signifient :

T : Le neutre du transformateur relié à la terre.

N : Les masses métalliques reliées au neutre.

Il existe deux types de schéma TN

- Le **TNC** où le neutre et le conducteur de protection (PE) sont **confondus**. Ce schéma est interdit pour les faibles sections.
- Le **TNS** où le neutre et le conducteur de protection (PE) sont **séparés**.



Boucle de Défaut

Les prises de terre du neutre et des masses sont interconnectées.
En cas de défaut, un courant I_d circule dans le conducteur PE ou PEN.

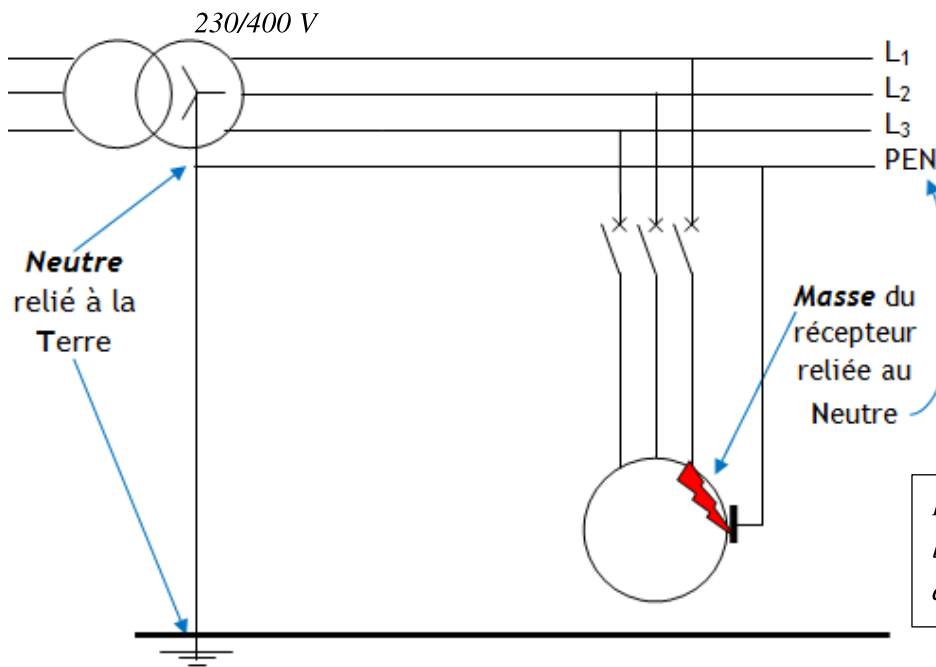


Schéma électrique du défaut

Lorsque le courant $I_d = I_{cc}$, on fait l'hypothèse que les impédances amont réduisent la tension de 20 %.

Danger potentiel et principe de protection

Un défaut d'isolement se traduit par un (Risque d'incendie).

Courant de défaut

Le courant de défaut n'est limité que par la résistance des conducteurs (phase et protection) :

$$I_d = \dots \dots \dots \text{ Sachant que : } R_{ph} = \rho \cdot L / S_{ph} \text{ et } R_{pe} = \rho \cdot L / S_{pe}$$

$$I_d = \dots \dots \dots \text{ en posant } m = S_{ph} / S_{pe} \text{ Soit : } I_d = \dots \dots \dots$$

Tension de contact

$$\text{Si } R_{ph} = R_{pe} \text{ donc } U_c = \dots \dots \dots = \dots \dots \dots = \dots \dots \dots = \dots \dots \dots$$

Cette tension est potentiellement car elle est supérieure à la tension limite de sécurité $U_L = 50 \text{ V}$.

⇒ La coupure de l'installation est dès l'apparition du premier défaut

Protection

Contre les surintensités, il faut s'assurer que :

- Pour un disjoncteur : $I_{mag} < \dots \dots \dots$ avec $m = S_{ph} / S_{pe}$
(I_{mag} : courant de fonctionnement du déclencheur magnétique).
- Pour un fusible : $I_{fusion} < \dots \dots \dots$ (I_{fusion} : courant de fusion du fusible).

Il faut vérifier que $t_f \leq t_c$.

- t_f : temps de coupure du dispositif de protection
- t_c : temps de coupure maximal autorisé par la norme

Tension nominale	Temps de coupure (s)	
	$U_L = 50 \text{ V}$	$U_L = 25 \text{ V}$
230 V	0,4	0,2
400 V	0,2	0,06

15. Régime IT

Les deux lettres qui définissent ce régime signifient :

I : Le neutre du transformateur est isolé de la terre.

T : Les masses métalliques sont reliées à la terre.

Boucle de Défaut : Premier défaut

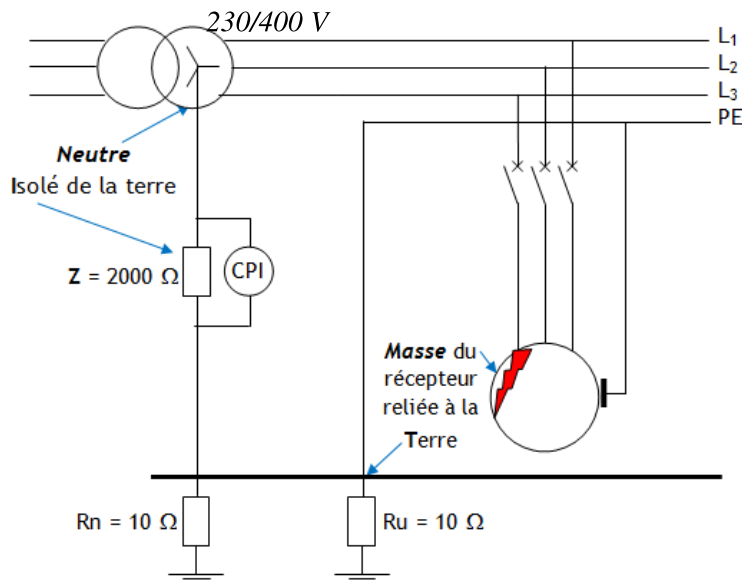
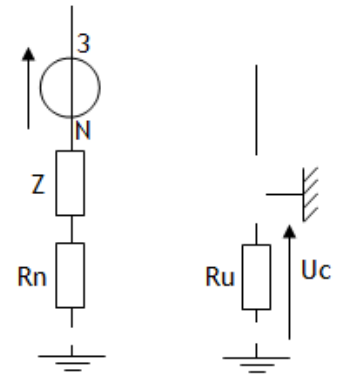


Schéma électrique du défaut



Danger potentiel et principe de protection

Courant de défaut

Lors d'un défaut d'isolement, un courant de défaut circule par la terre :

$$I_d = \dots = \dots = \dots$$

Tension de contact

La tension de contact apparaît entre les masses métalliques et le sol est : $U_c = \dots = \dots = \dots$

⇒ Tension \dots pour les personnes.

La coupure n'est pas \dots . Mais le défaut doit être \dots

Protection

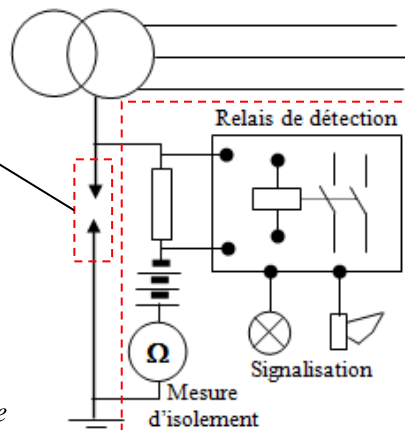
L'appareil qui signale ce premier défaut est le contrôleur permanent d'isolement (C.P.I.).

Limiteur de surtension (cardew)



Cardew

Il permet d'écouler à la terre les surtensions dangereuses susceptibles d'apparaître comme un défaut à la terre dans le poste de transformation ou un amorçage entre enroulements HT et BT d'un transformateur.



Contrôleur Permanent d'Isolement



C.P.I.

Il permet de contrôler en permanence l'isolement du réseau.

Un générateur injecte du courant continu entre le réseau et la terre.

- Absence de défaut : le courant continu ne circule pas entre le réseau et la terre.
- Présence de défaut : un faible courant est débité sur le réseau et le relais actionne les alarmes.

Boucle de Défaut : deuxième défaut

En cas de double défaut, il y a présence d'un fort courant de (entre phases) et d'une tension de contact (U_c)

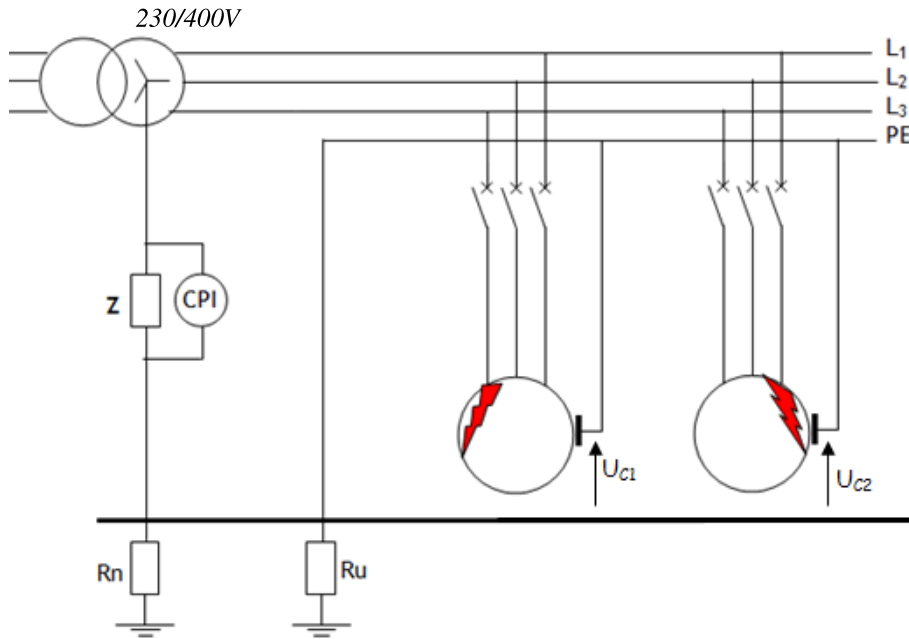
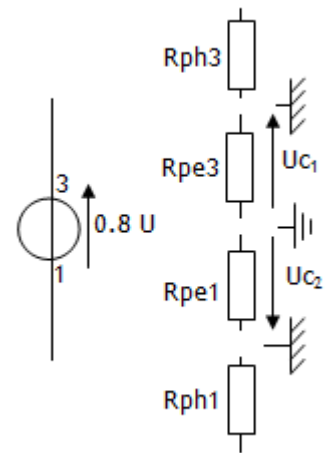


Schéma électrique du défaut



Danger potentiel et principe de protection

Si un deuxième défaut apparaît avant l'élimination du premier défaut, un courant de (risque d'incendie) s'établit entre phases ou entre phase et neutre.

Courant de défaut

Le courant de défaut n'est limité que par la résistance des conducteurs (phases et protection) :

$I_d = \dots\dots\dots$

Si : $R_{ph1} = R_{ph3} = R_{ph}$ et $R_{pe1} = R_{pe3} = R_{pe}$ → $I_d = \dots\dots\dots$

$I_d = \dots\dots\dots$ en posant $m = S_{ph}/S_{pe}$ Soit : $I_d = \dots\dots\dots$

Tension de contact

Si $R_{ph} = R_{pe}$ donc $U_{c1} = \dots\dots\dots = \dots\dots\dots = \dots\dots\dots$

Cette tension est potentiellement car elle est supérieure à la tension limite $U_L = 50 V$.

⇒ La coupure de l'installation est dès l'apparition du deuxième défaut

Protection

La coupure est assurée par les protections contre les **surintensités**. Il faut s'assurer que :

- Pour un disjoncteur : $I_{mag} < \dots\dots\dots$ avec $m = S_{ph}/S_{pe}$

(I_{mag} : courant de fonctionnement du déclencheur magnétique).

- Pour un fusible : $I_{fusion} < \dots\dots\dots$ (I_{fusion} : courant de fusion du fusible).

Il faut vérifier que $t_f \leq t_c$.

- t_f : temps de coupure du dispositif de protection
- t_c : temps de coupure maximal autorisé par la norme

Temps de coupure maximal t_c des protections		
Tension nominale U_0	Temps de coupure maximal en s	
	$U_L = 50V$	$U_L = 25V$
120 - 127	0,8	0,35
220 - 230	0,4	0,2
380 - 400	0,2	0,06
> 400	0,1	0,02

2 Protection électrique des matériels

21. Les différents défauts

Lors d'un fonctionnement normal, le courant qui circule dans le circuit sera inférieur au courant nominal I_N que peuvent supporter les composants.

Un défaut suppose que le fonctionnement est anormal. On peut maintenant dire que, dans certains cas, un défaut se traduit par un courant I_D supérieur au courant nominal I_N ($I_D > I_N$).

Les surcharges

La surcharge se caractérise par un courant légèrement à l'intensité nominale ($I_N < I_D < 5.I_N$).

Elle peut être due :

- À trop d'appareils branchés sur une même prise ;
- Au remplacement d'un appareil par un appareil plus puissant ;
- À un blocage ou une charge mécanique trop importante pour un moteur...

Elle a pour conséquence une augmentation de la température des composants de l'installation. Cela entraîne un vieillissement plus rapide des isolants, la détérioration du matériel (fusion des matières) jusqu'à l'incendie.

Pour se protéger, il faudra couper le courant d'autant plus vite que la surcharge est importante (entre une seconde et quelques heures).

Les courts-circuits

La surintensité se caractérise par un courant très à l'intensité nominale ($I_D > 5.I_N$).

Elle a lieu lorsque 2 conducteurs différents entrent en contact (court-circuit) à la suite :

- De la déconnexion d'un conducteur ;
- De la détérioration des isolants ;
- D'une mauvaise manœuvre ;
- D'une surcharge.

Elle entraîne une élévation très importante de la température des composants, la présence d'arcs électriques (étincelles) qui provoquent souvent un incendie.

Pour se protéger contre les surintensités, il faudra couper le courant instantanément (quelques centièmes de seconde).

Les surcharges et les surintensités sont des risques pour les biens matériels.

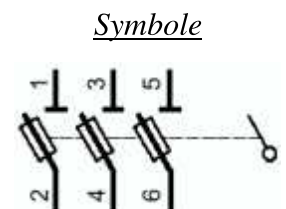
22. Dispositifs de protection

221. Fusibles

Coupe-circuit ou sectionneur

Le fusible est généralement associé à un coupe circuit ou sectionneur qui permet de l'insérer dans le circuit électrique. Le sectionneur réalise entre les circuits en amont et en aval de celui-ci lorsqu'il est en position ouverte.

C'est donc un organe de sécurité qui permettra de mettre hors-tension tout le circuit en aval.



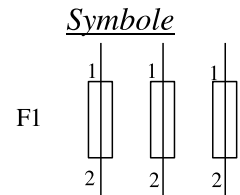


Utilisation domestique

Utilisation industrielle

Fusible

Rôle : Une cartouche fusible sert à protéger l'installation contre les *très fortes* et surtout contre les Elle permet également la transmission de l'énergie électrique.



Fusible ultra-rapide



Fusible pour automobiles



Cartouche fusible cylindrique



Cartouche fusible à couteau



Fusibles spéciaux

Fusibles pour utilisation domestique et industrielle

Fonctionnement

L'élément fusible est constitué d'un fil métallique dans une enveloppe fermé.

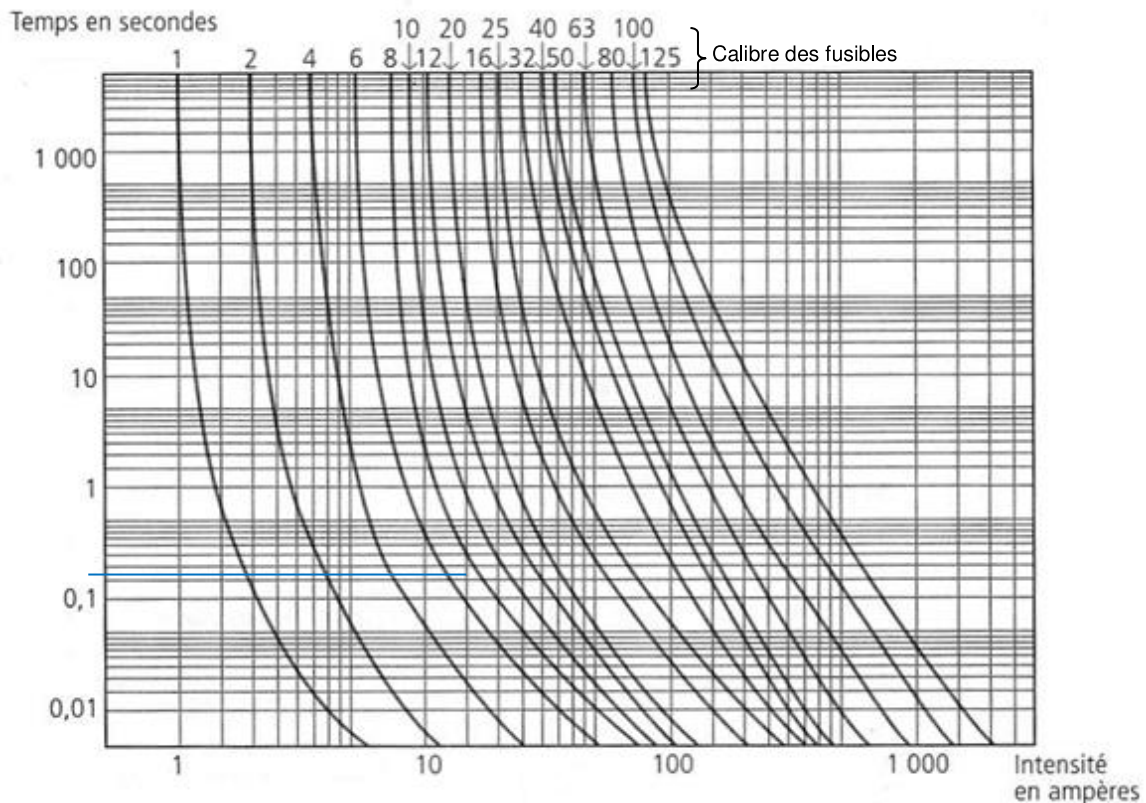
Le fusible fond si le courant qui le traverse dépasse la valeur assignée.

Il existe trois types principaux de fusibles :

- **Ultra rapide (prosistor)** : protection des semi-conducteurs (*protection contre les*);
- **Standard (type gG)** : usage général, protection câbles et tout type de récepteurs (*protection contre les* *et*),
- **Lent (type aM accompagnement Moteur)** : démarrage des moteurs, accepte un fort courant de démarrage durant quelques secondes (*protection contre les*).

Courbes de fusion d'une cartouche cylindrique type gG

Elles permettent de déterminer la durée de fonctionnement du fusible en fonction du courant qui le traverse avant sa fusion.



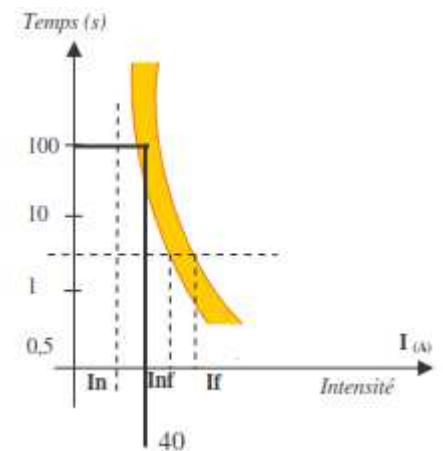
Exercice sur une cartouche gG 8A :

Donner le temps de fonctionnement pour un courant de : 8, 20, 70A (utiliser les courbes ci-dessus).

8A → s ; 20A → s ; 70A → s

Caractéristiques des fusibles

- **Tension nominale :** 250, 400, 500 ou 600 V.
- **Courant nominal :** I_n . C'est le calibre du fusible : *c'est l'intensité qui peut traverser indéfiniment un fusible sans provoquer ni échauffement anormal ni fusion.*
- **Courant de non-fusion :** I_{nf} . C'est le courant que peut supporter l'élément fusible pendant un temps spécifié.
- **Courant de fusion :** I_f . C'est le courant qui provoque la fusion avant expiration d'un temps spécifié
- **Courbe de fonctionnement d'un fusible :** Elle permet de déterminer la durée de fonctionnement du fusible en fonction du courant qui le traverse.
- **Pouvoir de coupure :** C'est le courant maximal que peut couper le fusible en évitant la formation d'un arc. Plus le pouvoir de coupure est élevé, et plus le fusible est apte à protéger l'installation. (Le PdC est de l'ordre du kA)



D'après la caractéristique une surcharge de 40A fera fondre la cartouche en 100s

Exemple : Fusible gG, calibre 16 A, $U_n = 500$ V, PdC = 20 kA.

Choix d'un fusible

On choisit le cartouche fusible en fonction des caractéristiques suivantes :

- La classe du fusible : **gG** ou **aM**.
- Le calibre **I_n** ou intensité nominale.
- La tension nominale d'emploi (**U_e**).
- La forme et la taille.
- Le Pouvoir de coupure (**$PdC > I_{cc}$**) en kA.
- Eventuellement le système déclencheur.

222. Disjoncteurs

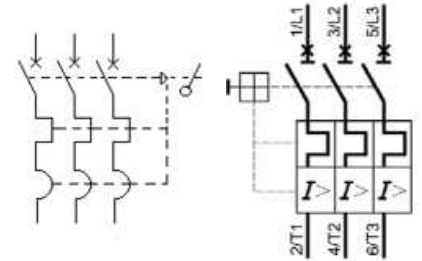
Fonction

Organes de commande et de protection, les disjoncteurs sont pratiquement tous magnétothermiques, c'est-à-dire composés :

- D'un déclencheur thermique (protection contre les)
- D'un déclencheur magnétique (protection contre les).

Le disjoncteur possède un « pouvoir de coupure » et agit directement sur le circuit de puissance.

Symbole :

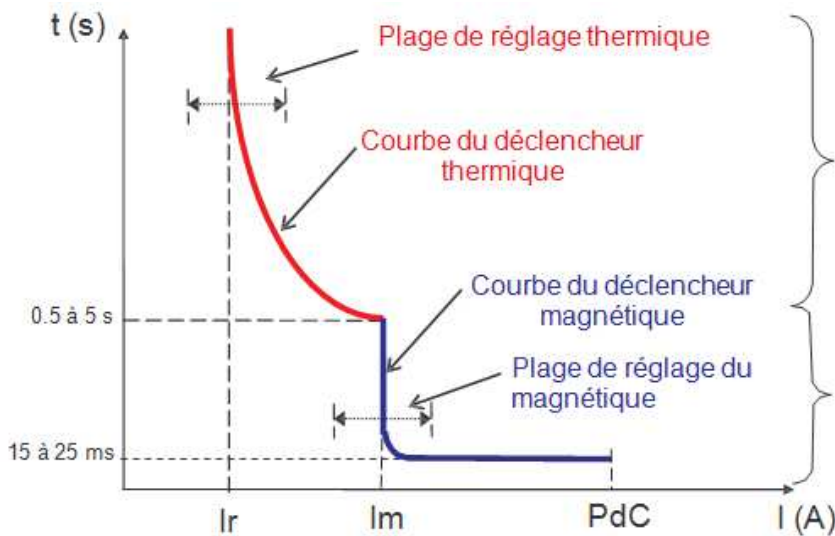


S'il est différentiel, il permet d'ouvrir le circuit en cas de détection d'un courant de défaut.



Courbe de déclenchement

La courbe de déclenchement résulte de l'association de la courbe de déclenchement du relais thermique et de la courbe de déclenchement du relais magnétique.



Zone de déclenchement thermique :
Le principe est le même que pour le relais thermique. La courbe est inversement proportionnelle au temps.

Zone de déclenchement magnétique :
Le déclenchement est instantané dès que l'on atteint le seuil de déclenchement. Le temps de déclenchement ne diminue pas avec l'augmentation du défaut.

Courant de réglage : I_r ou I_{rth} c'est le courant maximal que peut supporter le disjoncteur sans déclenchement du dispositif thermique (de 0,7 à 1 I_n).

Courant magnétique : I_m c'est le courant de fonctionnement du déclencheur magnétique en cas de court-circuit (de 2,5 à 15 I_n).

Les normes définissent 5 types de **courbes de déclenchement** :

Courbe de déclenchement	Courbe B 3 à 5 I_n	Courbe C 5 à 10 I_n	Courbe D 10 à 14 I_n	Courbe Z 2.4 à 3.6 I_n	Courbe MA 12.5 I_n
Utilisation	Protection des générateurs, des câbles de grande longueur et des personnes dans les régimes IT et TN	Applications courantes	Protection des circuits à fort appel de courant	Protection des circuits électroniques	Protection des départs moteurs

Critères de choix

Le choix d'un disjoncteur en basse tension s'effectue en fonction du circuit à protéger et en fonction des critères suivants :

- Le calibre I_n ou intensité assignée : Le choix du calibre se fait en relation avec l'intensité admissible dans la canalisation selon les règles de la norme C15-100.
- La tension nominale d'emploi (U_e).
- Le Pouvoir de coupure ($PdC > I_{cc}$) en kA.
- Le nombre de pôles protégés.
- Choix du bloc déclencheur :

Il dépend du circuit que l'on doit protéger.

- Choix de la courbe de déclenchement en fonction des récepteurs que l'on protège (pour les disjoncteurs divisionnaires).
- Détermination de I_r et I_m pour des disjoncteurs autres que divisionnaires.

Courbe de déclenchement d'un disjoncteur magnétothermique

Temps de déclenchement d'un disjoncteur réglé pour un courant nominal I_n :

Pour une surcharge de 5 I_n , le relais déclenchera entre ... et s.

Pour une surcharge de 20 I_n , le relais déclenchera en s.

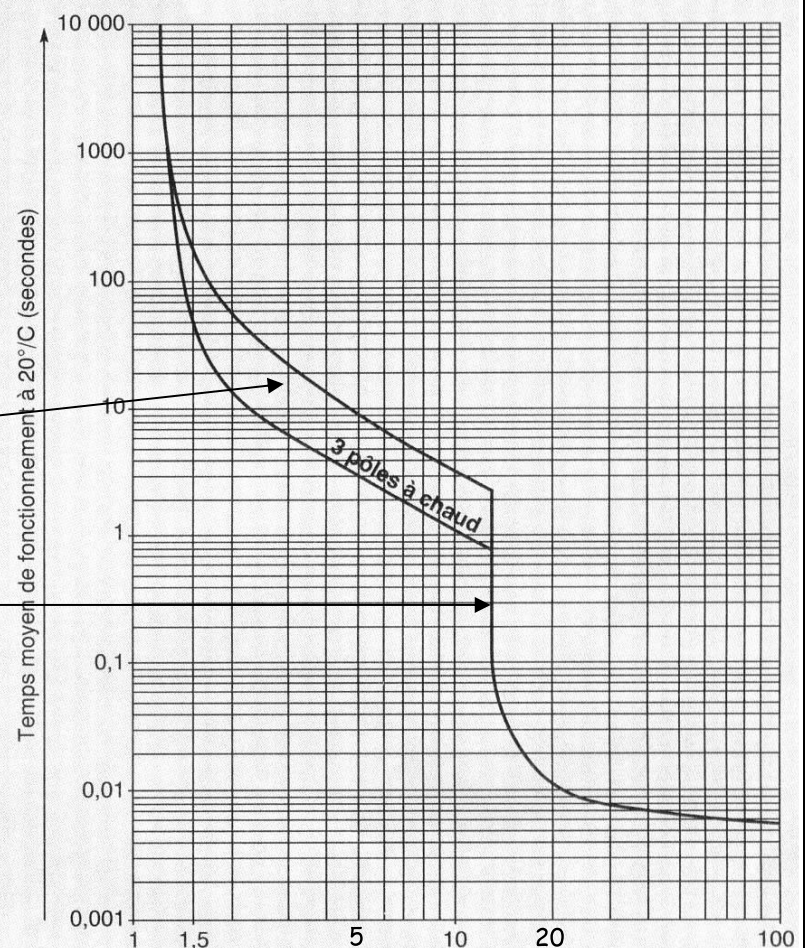
Partie thermique

(Protection contre les surcharges)

Partie magnétique

(Protection contre les courts circuits)

Courbe de déclenchement magnéto-thermique



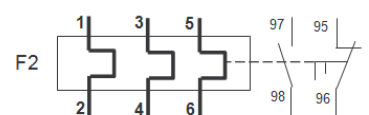
223. Relais thermique

Fonction

Le relais thermique permet de protéger le moteur contre les

Il ne possède pas de "pouvoir de coupure", il intervient seulement sur le circuit de commande. C'est à dire qu'il donne l'ordre aux contacts auxiliaires qui lui sont associés et qui sont insérés dans le circuit de commande, d'ouvrir le circuit de puissance. Comme il ne protège pas contre les courants de court-circuit, il doit obligatoirement être accompagné d'un fusible

Symbole





Caractéristiques électriques

Son principe est basé sur l'image thermique du courant. Il agit grâce à des bilames qui se déforment en fonction du courant qui les traverse. Un courant important qui traverse un bilame chauffe celui-ci et vient alors agir sur un contact. Le relais protège les moteurs contre :

- Les surcharges (augmentation anormale du courant pendant un temps assez long) ;
- Les coupures de phase où les déséquilibres de celles-ci.

Choix d'un relais thermique

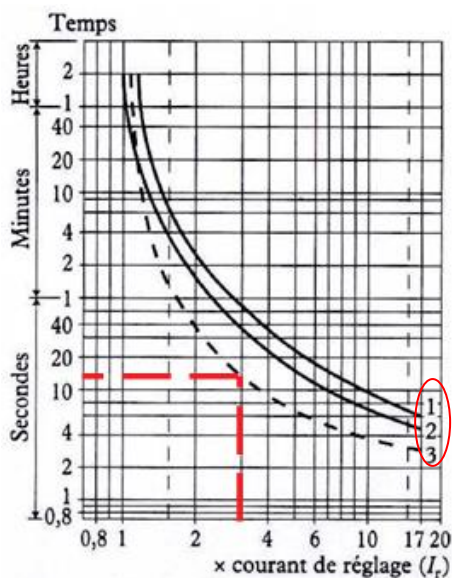
On choisit le relais thermique en fonction des caractéristiques suivantes :

- Le courant de réglage (I_r) : sa valeur dépend de la valeur du courant d'emploi (I_e) qui doit être comprise dans la plage de réglage du relais thermique. I_r est réglé soit sur I_e , soit sur $1,05 \times I_e$.
- La tension nominale (U_e).
- Le fonctionnement différentiel : Pour protéger l'équipement contre la marche en monophasé, le relais thermique doit être différentiel.
- La compensation en température : En cas d'utilisation dans un environnement froid ou chaud, il faudra que le relais thermique soit compensé.
- La classe de fonctionnement : Selon les durées de démarrage des moteurs, nous disposons de trois classes de relais thermiques.
 - **Classe 10** : déclenchement normal (démarrage de 4 à 10 s).
 - **Classe 20** : déclenchement faiblement temporisé (de 6 à 20 s).
 - **Classe 30** : déclenchement fortement temporisé (jusqu'à 30 s).

Courbe de déclenchement

Pour chaque classe de fonctionnement, le constructeur nous donne une courbe de déclenchement. Par exemple, si une surcharge de $3 \times I_r$ apparaît sur la ligne d'alimentation d'un moteur, pour un fonctionnement équilibré à chaud, le relais thermique classe 20 A déclenchera au bout de : **15 s**. Nous pouvons observer, sur cette courbe, que l'intensité minimale de déclenchement est égale à $1,15 \times I_r$. Cela veut dire que le relais thermique ne déclenchera pas lorsque $I = I_r$ mais lorsque $I = 1,15 \times I_r$.

Courbe de déclenchement LR2-D Classe 20A (Télemécanique)



3 Dispositifs de protection moyenne tension

Destinés à la protection des réseaux de distribution, et des postes de transformation.

31. Fusibles moyenne tension

Caractéristiques :

- Tension assignée : 3,6 - 7,2 - 12 - 17,5 - 24 – 36 KV ;
- Pouvoir de coupure : 20 – 32 – 40 – 50 - 63 KA ;
- Courant assigné : 6,3 - 10 - 16 – 20 – 25 - 31,5 – 40 - 50 – 63 - 80 -100 –125 - 160 - 200 - 250 A.



Fusibles MT Fusarc de chez Schneider Electric

32. Disjoncteur moyenne tension

Ces disjoncteurs utilisent la coupure dans l'hexafluorure de soufre (SF6) pour l'isolement et la coupure.

Caractéristiques :

- Tension assignée : 7,2 - 17,5 - 24 – 36 kV ;
- Courant de courte durée admissible : 12,5 – 16 – 20 – 25 kA ;
- Courant assigné : 400 – 630 – 1 250 A.



Disjoncteur moyenne tension pour l'intérieur de chez Schneider Electric

1 Introduction

11. Nécessité de la conversion d'énergie

L'énergie électrique est fournie à une tension et à une fréquence, il est souvent nécessaire d'agir sur ses paramètres afin de s'adapter au récepteur, cette possibilité est obtenue par des systèmes d'électronique de puissance.

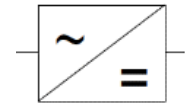
On nomme ce procédé, elle est réalisée par des systèmes appelés **convertisseurs statiques**.

12. Classification des convertisseurs statiques

Tension d'entrée	Tension de sortie	Symbole	Fonction	Applications
Alternative	Continue		..... à diodes à thyristors	Variation de vitesse des MCC
	Alternative		.....	Démarrage, variation de vitesse, variation éclairage, fours électriques
Continue	Alternative		.....	Variation de vitesse des moteurs à courant alternatif et alimentation de sécurité.
	Continue		.....	Variation de vitesse des MCC

2 Redresseurs

Les redresseurs assurent la conversion d'une tension alternative en une tension continue. Ils servent à alimenter un récepteur en continu à partir du réseau de distribution alternatif.



21. Redresseurs à diodes (non commandés)

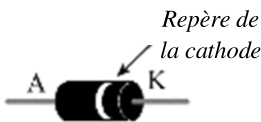
Dans ses redresseurs, l'élément commutateur utilisé est

Diode

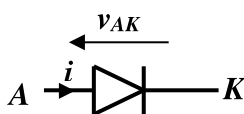
La diode est un **dipôle passif polarisé**.

En électrotechnique, la diode est équivalente à un interrupteur unidirectionnel non commandé.

Aspect :



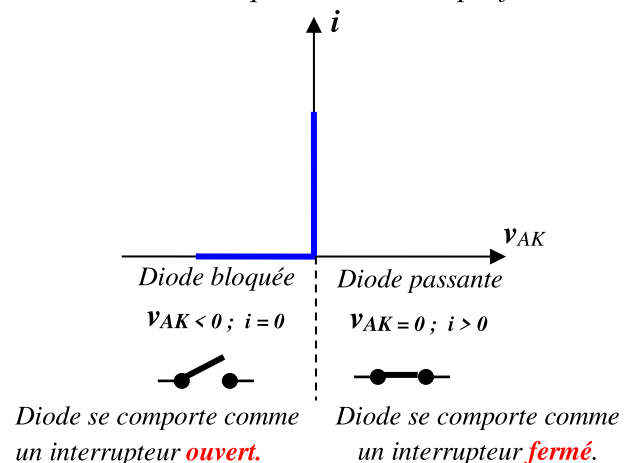
Symbole :



Jonction :



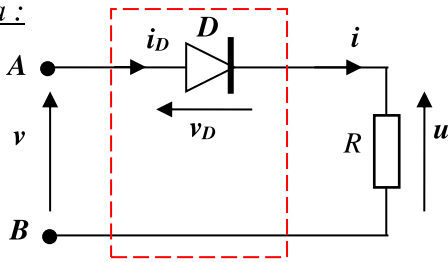
Caractéristique d'une diode parfaite



Redressement monophasé

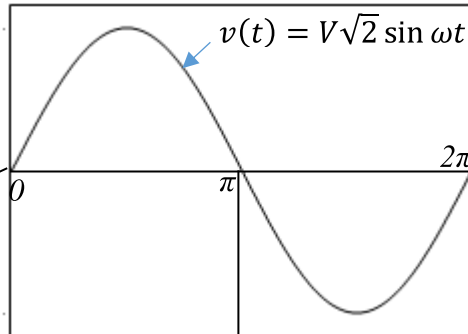
Redressement simple alternance (charge résistive)

Schéma :



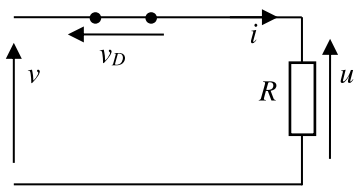
v : tension d'entrée du pont.
 u : tension de sortie.
 R : charge résistive.
 D : diode parfaite.

Analyse du fonctionnement et les oscillogrammes



$0 < \theta < \pi \rightarrow v > 0$ alternance positive $\rightarrow v_A > v_B$

D est passante (interrupteur fermé) $v_D = \dots$

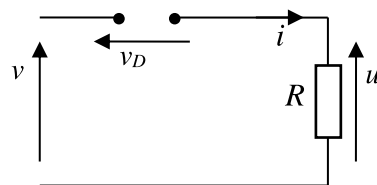


Loi des mailles donne : $v - v_D - u = 0$ donc : $u = \dots$

$v_D = \dots$	$i = \dots$
$u = \dots$	$i_D = \dots$

$\pi < \theta < 2\pi \rightarrow v < 0$ alternance négative $\rightarrow v_B > v_A$

D se bloque (interrupteur ouvert) $i = \dots$ et $u = \dots$

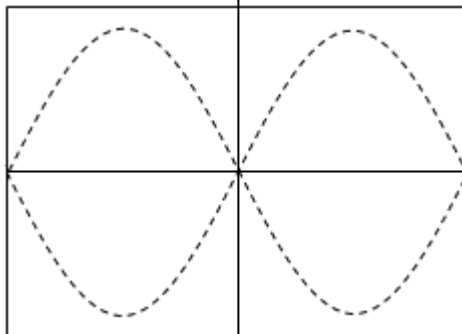


Loi des mailles donne : $v - v_D - u = 0$ donc : $v_D = \dots$

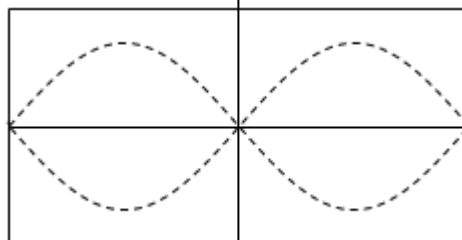
$i = \dots$	$v_D = \dots$
$u = R \cdot i = \dots$	$i_D = \dots$

Dessiner les tensions :

- $u(t)$ en bleu
- $v_D(t)$ en rouge



Dessiner le courant $i(t)$ en bleu



Grandeurs caractéristiques

Valeur moyenne de $u(t)$:

$$\langle u \rangle = \frac{S}{T} = \dots$$

Valeur efficace de $u(t)$:

$$U = \sqrt{\frac{S^2}{T}} = \frac{V\sqrt{2}}{2}$$

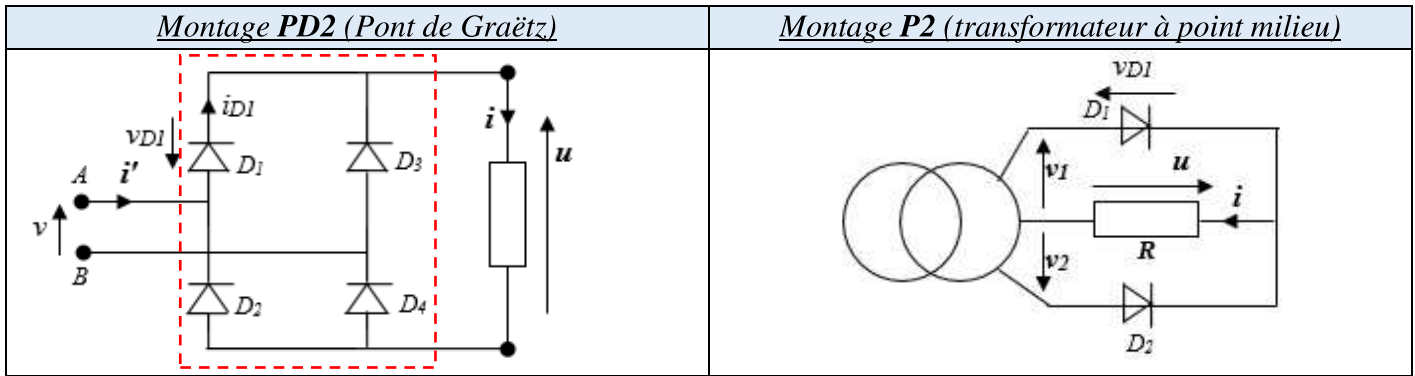
Courant moyen dans la diode :

$$\langle i_D \rangle = \langle i \rangle$$

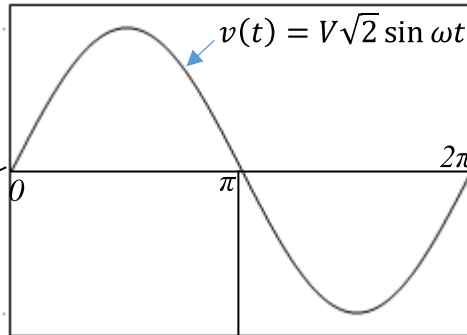
Tension maximale supportée par la diode :

$$v_{Dmax} = \dots$$

Redressement double alternance (charge résistive)



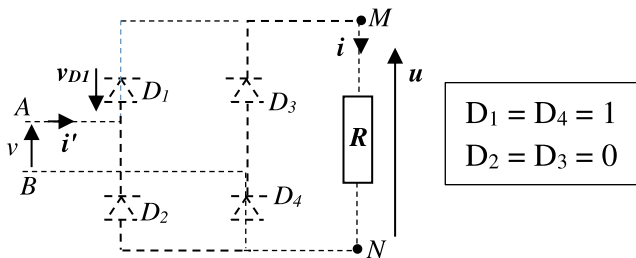
Analyse du fonctionnement et les oscillogrammes (Pont de Graëtz) :



$0 < \theta < \pi \rightarrow v > 0$ alternance positive $\rightarrow v_A > v_B$

Le courant i circule la maille suivante :

$A \rightarrow D_1 \rightarrow R \rightarrow D_4 \rightarrow B$



$$u = v_M - v_N = \dots = \dots$$

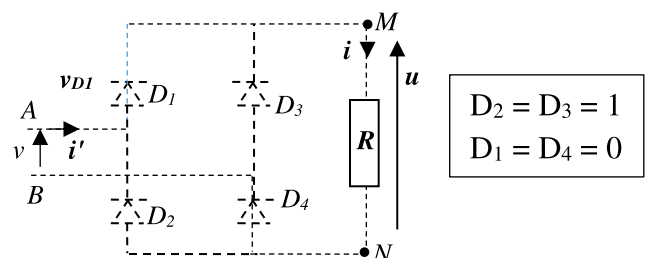
$$i = u/R = v/R \text{ et } i' = \dots$$

$$v_{D1} = \dots \text{ et } i_{D1} = \dots$$

$\pi < \theta < 2\pi \rightarrow v < 0$ alternance négative $\rightarrow v_B > v_A$

Le courant i circule la maille suivante :

$B \rightarrow D_3 \rightarrow R \rightarrow D_2 \rightarrow A$



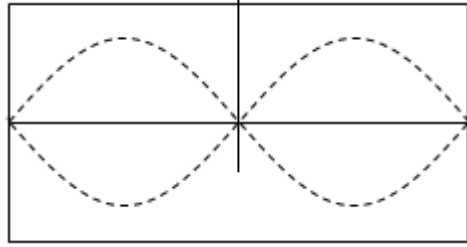
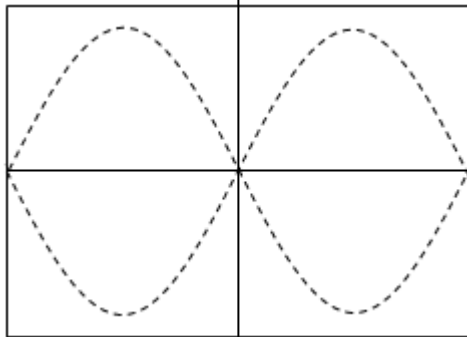
$$u = v_M - v_N = \dots = \dots$$

$$i = u/R = -v/R \text{ et } i' = \dots$$

$$v_{D1} = \dots \text{ et } i_{D1} = \dots$$

Dessiner les tensions :

- $u(t)$ en bleu
- $v_{D1}(t)$ en rouge



Dessiner le courant $i(t)$ en bleu

Grandeurs caractéristiques

Valeur moyenne de $u(t)$:

$$\langle u \rangle = \frac{\dots}{\dots}$$

Valeur efficace de $u(t)$:

$$U = V$$

Courant moyen dans une diode :

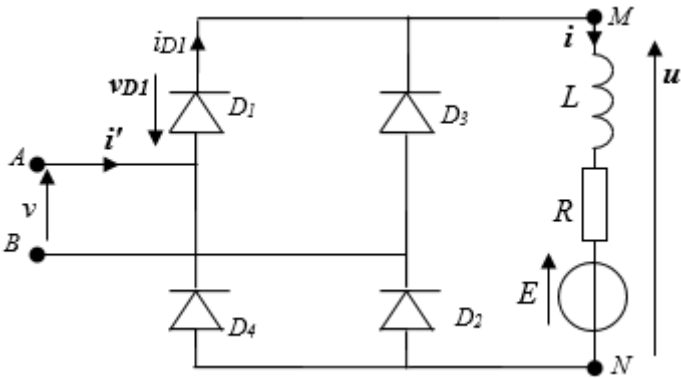
$$\langle i_D \rangle = \frac{\langle i \rangle}{2}$$

Tension maximale supportée par une diode :

PD2: $v_{Dmax} = V\sqrt{2}$

P2: $v_{Dmax} = 2V\sqrt{2}$

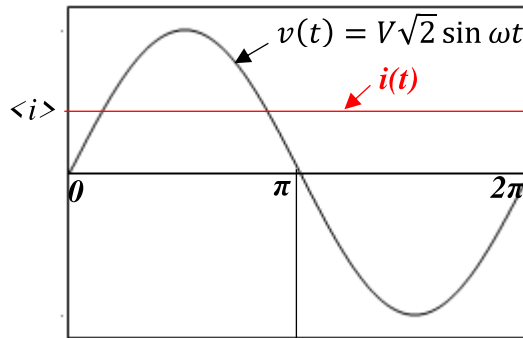
Redressement double alternance (charge R, L, E)



v : Tension d'entrée du montage.
 u : Tension de sortie.
 v_{D1} : Tension aux bornes de la diode D_1 .
 R : Résistance de la charge.
 L : Inductance de la charge.
 E : F.é.m. de la charge.
 i_{D1} : Courant traversant la diode D_1 .
 i' : Courant alimentant le redresseur.

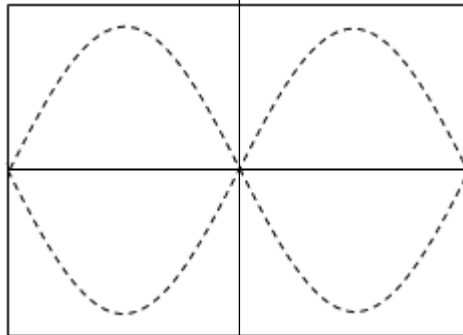
La charge R, L, E , représente un moteur à courant continu en série avec une inductance de lissage pour rendre le courant continu $i(t) = \langle i \rangle$.

Analyse du fonctionnement et les oscillogrammes

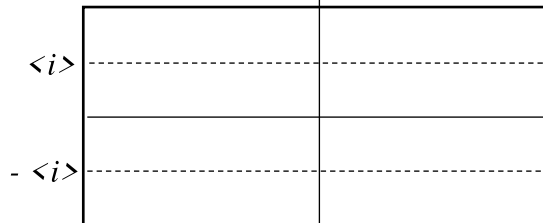


$0 < \theta < \pi$	$\pi < \theta < 2\pi$
$u = \dots$	$u = \dots$
$i_{D1} = \dots$	$i_{D1} = \dots$
$i' = \dots$	$i' = \dots$

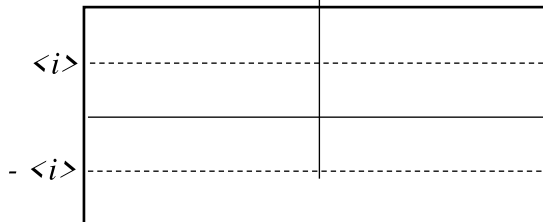
Dessiner la tension $u(t)$ en bleu



Dessiner le courant $i_{D1}(t)$ en rouge



Dessiner le courant $i'(t)$ en bleu



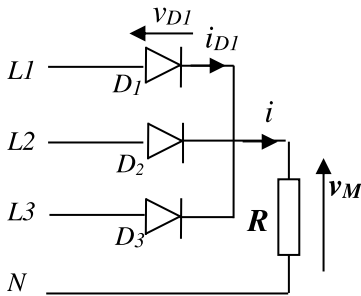
Redressement triphasé (charge résistive)

Lorsque la puissance demandée par le récepteur atteint une certaine valeur ($> 10 \text{ KW}$), il est intéressant de l'alimenter à partir du réseau triphasé.

Redressement simple alternance : Montage P3 à cathodes communes

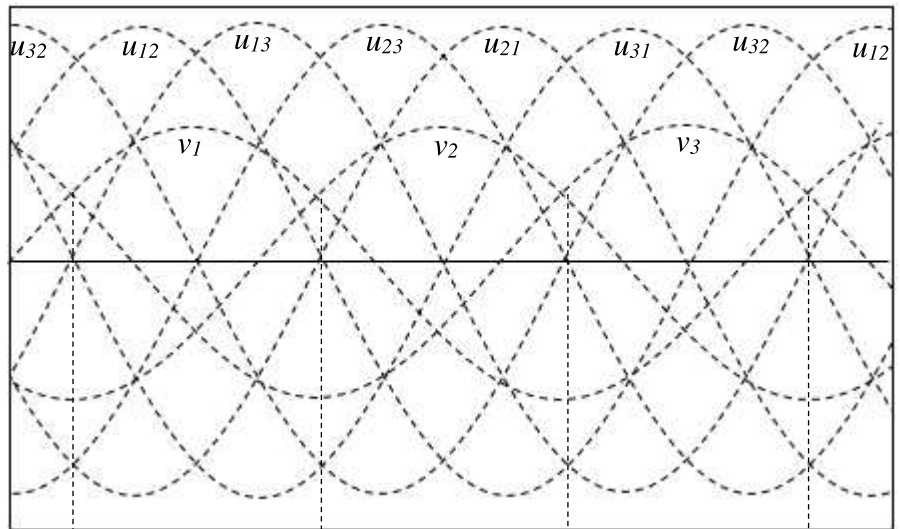
Analyse du fonctionnement et les oscillogrammes

Dessiner les tensions $v_M(t)$ en bleu et $v_{D1}(t)$ en rouge



$v_M = v_1, v_2$ ou v_3 la plus positive à l'instant considéré :

v_M est constituée donc par les «calottes supérieures» des sinusoïdes v_1, v_2, v_3 .

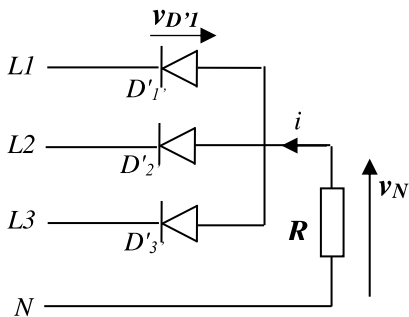


Tension v_M	....	....	....	....	....
Diodes passantes	....	....	....	....	....
Tension v_{D1}	....	....	.....	.....	....

Redressement simple alternance : Montage P3 à anodes communes

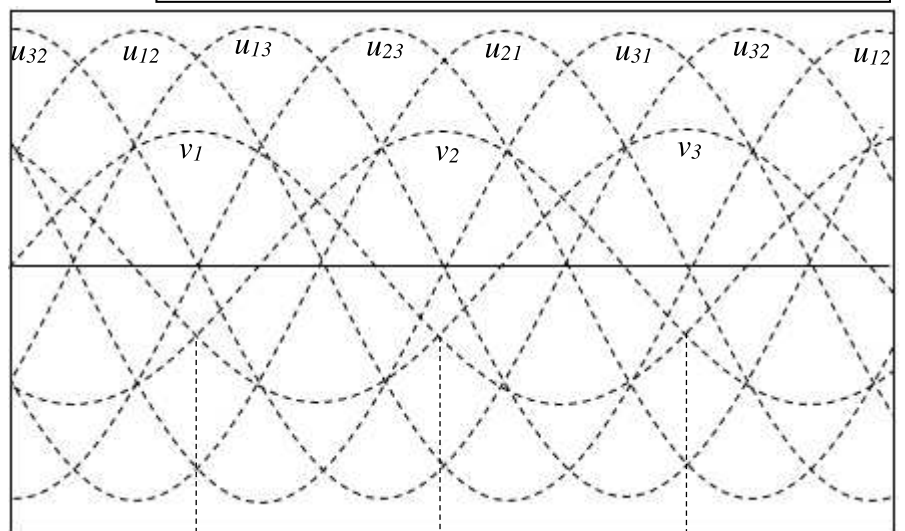
Analyse du fonctionnement et les oscillogrammes

Dessiner les tensions $v_N(t)$ en bleu et $v_{D'1}(t)$ en rouge



$v_N = v_1, v_2$ ou v_3 la plus négative à l'instant considéré :

v_N est constituée donc par les «calottes inférieures» des sinusoïdes v_1, v_2, v_3 .



Tension v_N	....	....	....	....	....
Diodes passantes	....	....	....	....	....
Tension $v_{D'1}$	....	.....	....	.....	....

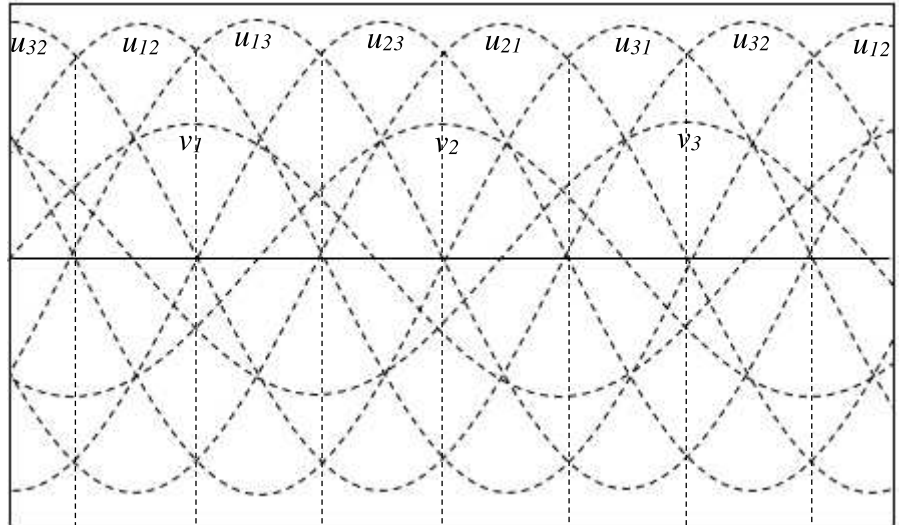
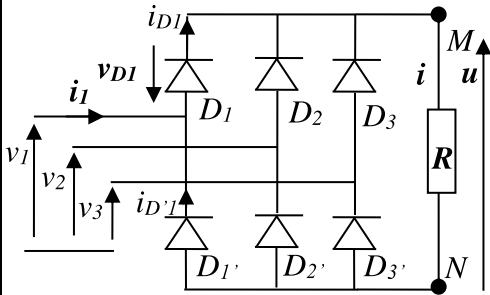
Grandeurs caractéristiques

- Valeur moyenne des tensions v_M et v_N : $\langle v_M \rangle = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} V\sqrt{2}$ et $\langle v_N \rangle = -\frac{3\sqrt{3}}{2\pi} V\sqrt{2}$
- Courant moyen dans une diode : $\langle i_D \rangle = \frac{\langle i \rangle}{3}$
- Tension maximale supportée par une diode : $V_{Dmax} = \sqrt{3}V\sqrt{2}$

Redressement double alternance : Montage PD3 (Pont de Graëtz triphasé)

Analyse du fonctionnement et les oscillogrammes

Dessiner les tensions $u(t)$ en bleu et $v_{D1}(t)$ en rouge



Le pont redresseur comporte:

- 3 diodes pour l'« aller »: D_1, D_2, D_3 ;
- 3 diodes pour le « retour »: D'_1, D'_2, D'_3 .

La tension $u = v_M - v_N$

Tension v_M	...	....	....	....	....
Diodes « aller »	D_3	D_1	D_2	D_3	D_1
Tension v_N	....	....	....	....	....
Diodes « retour »	D'_2	D'_3	D'_1	D'_2	D'_3
Tension u	...	...	...	...	...
Tension v_{D1}	u_{13}	0	$v_1 - v_2 = u_{12}$	$v_1 - v_3 = u_{13}$	0

Grandeurs caractéristiques

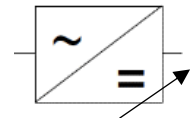
- Valeur moyenne de la tension $u(t)$: $\langle u \rangle = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V\sqrt{2}$
- Courant moyen dans une diode : $\langle i_D \rangle = \frac{\langle i \rangle}{3}$
- Tension maximale supportée par une diode : $V_{Dmax} = \sqrt{3}V\sqrt{2}$

Remarque

Pour une charge R, L, E , dont l'inductance L est suffisante, le courant i est considéré constant. La tension $u(t)$ a la même forme que le montage précédent (c.à.d. charge résistive).

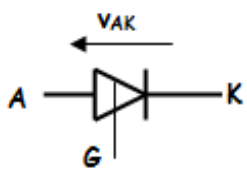
22. Redresseurs à thyristors (commandés)

L'intérêt du redressement commandé et qu'il permette de faire varier la tension moyenne en sortie du pont et donc de faire varier par exemple la vitesse de rotation d'un moteur à courant continu.

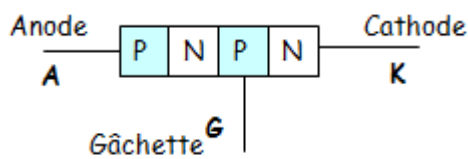


Thyristor

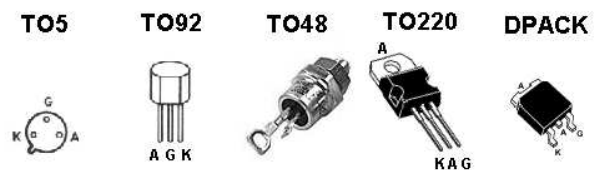
Aspect : Il comporte 3 broches. Il faut se référer à un catalogue pour connaître l'ordre du brochage.



Symbole



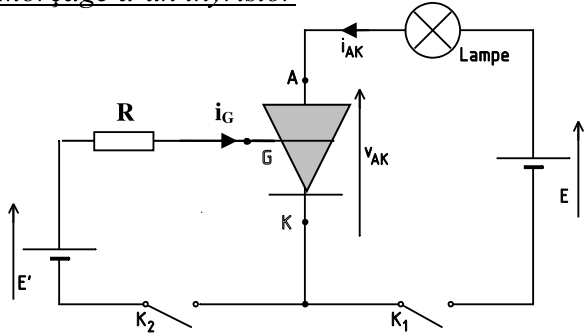
Description



Aspect

On se limite à l'étude des redresseurs commandés monophasés

Amorçage d'un thyristor



- ❶ On ferme K_1 : lampe est éteinte donc Th est bloqué.
- ❷ On ferme K_2 : lampe s'allume donc Th est passant.
- ❸ On ouvre K_2 : lampe reste allumée donc Th est passant.
- ❹ On ouvre K_1 : lampe s'éteint donc Th se bloque.
- ❺ On ferme K_1 : lampe reste éteinte donc Th est bloqué.

Conclusion :

Pour amorcer un thyristor : il faut que la tension v_{AK} soit positive et un courant de gâchette suffisant le temps que i_{AK} s'établisse. Le thyristor se comporte alors comme un interrupteur fermé.

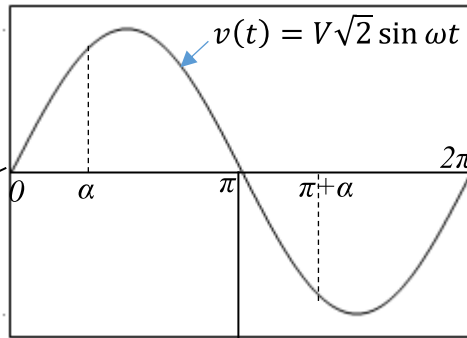
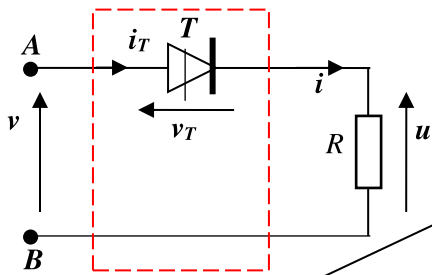
Pour bloquer le thyristor : il faut annuler le courant i_{AK} ou appliquer une tension v_{AK} négative. Le thyristor se comporte alors comme un interrupteur ouvert.

Retard à l'amorçage

Le thyristor est amorcé avec un angle de retard α . Cet angle est calculé par rapport au passage par zéro de la tension d'entrée v .

Redressement simple alternance (charge résistive)

Schéma de montage, analyse du fonctionnement et les oscillogrammes



v est la tension d'entrée du pont.
 u est la tension de sortie.
 R est la charge résistive.

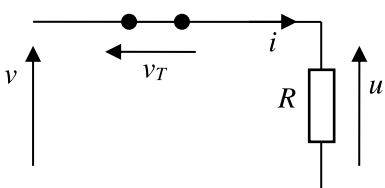
$0 < \theta < \pi \rightarrow v > 0$ alternance positive $\rightarrow v_A > v_B$

Le thyristor T est supposé parfait.

- Pas d'impulsion sur la gâchette : $u = \dots$ et $i = \dots$
- Loi des mailles donne : $v - v_T - u = 0$
 $\rightarrow v_T = v - u = v > 0$

Donc le thyristor est susceptible d'être amorcé.
 L'amorçage s'effectue avec le retard t_0 , qui correspond à l'angle $\alpha = \omega \cdot t_0$ appelé l'angle de retard à l'amorçage.

À $\theta = \alpha$ le thyristor est amorcé



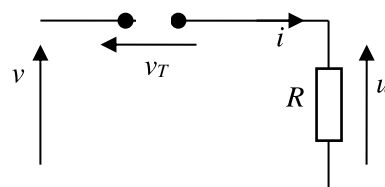
$v_T = \dots$
 $u = \dots$
 $i = u/R = \dots$

à $\theta = \pi$

Le courant i s'annule ce qui bloque le thyristor.

$\pi < \theta < 2\pi \rightarrow v < 0$ alternance négative $\rightarrow v_B > v_A$

Si l'on envoie un courant de gâchette alors que la tension est négative, le thyristor reste bloqué.



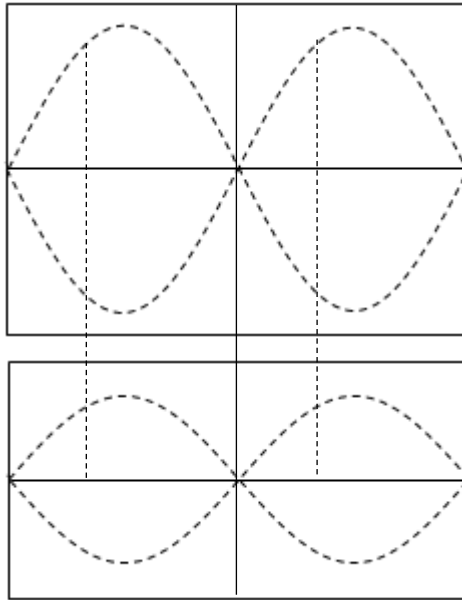
$i = \dots$
 $u = R i = \dots$
 $v_T = \dots$

Dessiner les tensions :

- $u(t)$ en rouge
- $v_{T1}(t)$ en bleu

Dessiner le courant :

$i(t)$ en rouge



Grandeurs caractéristiques

Valeur moyenne de $u(t)$:

$$\langle u \rangle = \frac{\dots}{\dots} \left(\frac{1 + \cos \alpha}{2} \right)$$

Valeur efficace de $u(t)$:

$$U = \frac{V\sqrt{2}}{2} \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi}}$$

Courant moyen dans le thyristor :

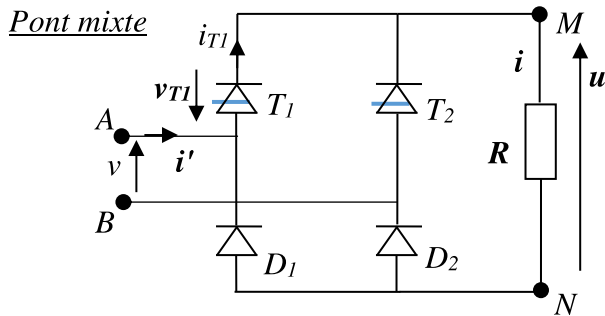
$$\langle i_T \rangle = \langle i \rangle$$

Tension maximale supportée par le thyristor :

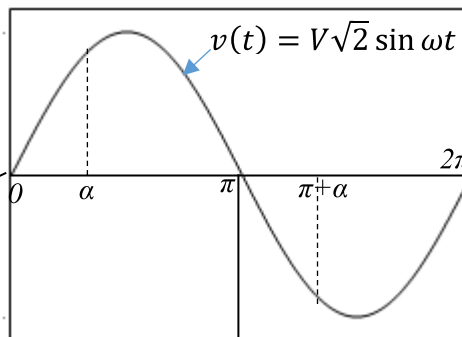
$$v_{Tmax} = V\sqrt{2}$$

Redressement double alternance (charge résistive)

Schéma de montage, analyse du fonctionnement et les oscillogrammes



v : tension d'entrée alternative du montage.
 u : tension de sortie aux bornes de R.
 v_{T1} : tension aux bornes du thyristor T_1 .
 R : est la charge résistive.



$0 < \theta < \pi \rightarrow v > 0$ alternance positive $\rightarrow v_A > v_B$

Le thyristor T_1 est susceptible d'être amorcé mais il ne sera amorcé que lorsque $\theta = \alpha$.

A $\theta = \alpha$: T_1 est amorcé, le courant i circule la maille : $A \rightarrow T_1 \rightarrow$ charge $\rightarrow D_2 \rightarrow B$

$$u = v_M - v_N = \dots - \dots = \dots$$

$$i = u/R = \dots$$

$$v_{T1} = v_{D2} = \dots$$

$$i_{T1} = i_{D2} = \dots$$

A $\theta = \pi$: Le courant i s'annule ce qui bloque le thyristor ...

$\pi < \theta < 2\pi \rightarrow v < 0$ alternance négative $\rightarrow v_B > v_A$

Le thyristor T_2 est susceptible d'être amorcé mais il ne sera amorcé que lorsque $\theta = \pi + \alpha$.

A $\theta = \pi + \alpha$: T_2 est amorcé, le courant i circule la maille : $B \rightarrow T_2 \rightarrow$ charge $\rightarrow D_1 \rightarrow A$

$$u = v_M - v_N = \dots - \dots = \dots$$

$$i = u/R = \dots$$

$$v_{T1} = v_{D2} = \dots$$

$$i_{T1} = i_{D2} = \dots$$

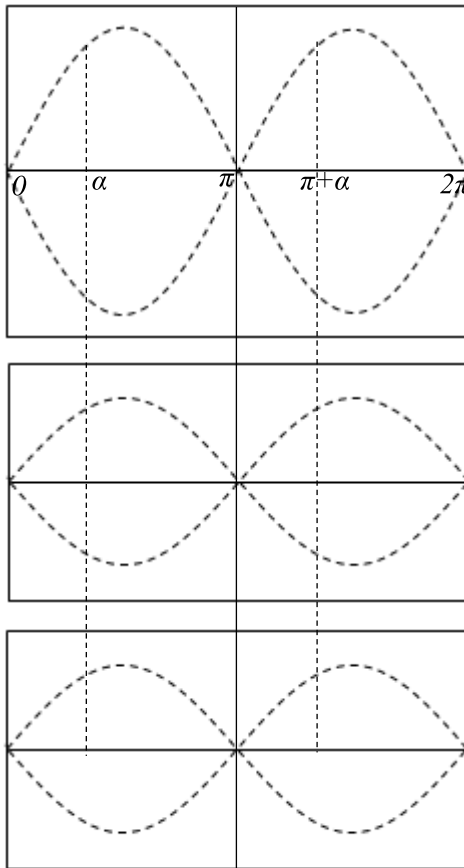
A $\theta = 2\pi$: Le courant i s'annule ce qui bloque le thyristor ...

Dessiner les tensions :

- $u(t)$ en rouge
- $v_{T1}(t)$ en bleu

Dessiner le courant $i(t)$ en rouge

Dessiner le courant $i_{T1}(t)$ en rouge



Grandeurs caractéristiques

Valeur moyenne de $u(t)$:

$$\langle u \rangle = \frac{2V\sqrt{2}}{\pi} \left(\frac{1 + \cos \alpha}{2} \right)$$

Valeur efficace de $u(t)$:

$$U = V \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi}}$$

Courant moyen dans un élément :

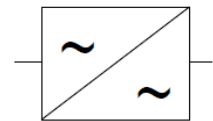
$$\langle i_D \rangle = \langle i_T \rangle = \frac{\langle i \rangle}{2}$$

Tension maximale supportée par les éléments :

$$v_{Tmax} = v_{Dmax} = V\sqrt{2}$$

3 Gradateurs

Le gradateur est un convertisseur alternatif - alternatif, capable de faire varier la tension efficace aux bornes d'une charge.

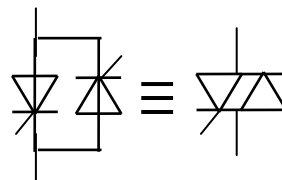


31. Interrupteurs électroniques

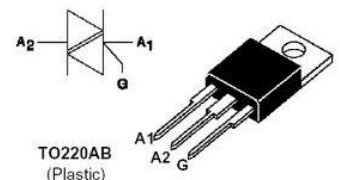
L'interrupteur est constitué par deux thyristors tête-bêche.

Pour les faibles puissances, les deux thyristors sont remplacés par un triac.

2 thyristors tête-bêche

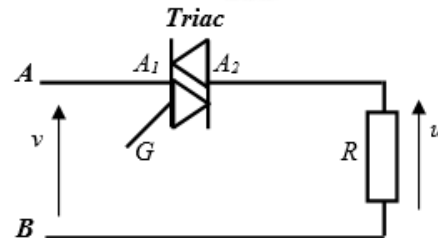
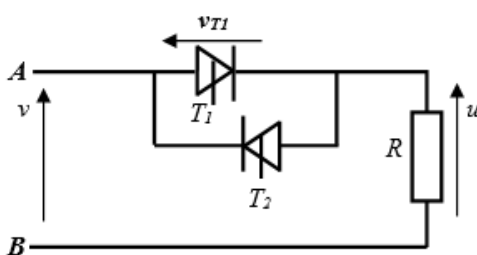


Triac



32. Gradateur monophasé (charge résistive)

Schéma de montage, analyse du fonctionnement et les oscillogrammes

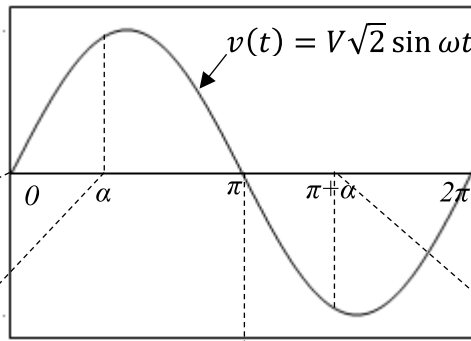


Deux modes de commande de l'énergie transférée à la source sont possibles :

Commande par la phase

Les deux thyristors doivent être commandés avec le même angle de retard α pour obtenir une tension u alternative (valeur moyenne nulle).

La variation de la valeur efficace U est obtenue en agissant sur l'angle de retard α .

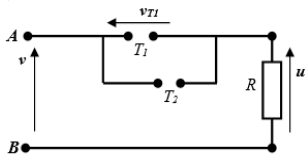


$0 < \theta < \pi \rightarrow v > 0$ alternance positive $\rightarrow v_A > v_B$

$\pi < \theta < 2\pi \rightarrow v < 0$ alternance négative $\rightarrow v_B > v_A$

$0 < \theta < \alpha$

T_1 et T_2 sont bloqués (aucune commande)

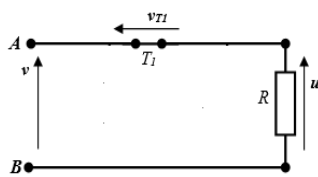


Le thyristor T_1 est susceptible d'être amorcé car $v_{T1} = v$ et $v > 0$

$$\begin{aligned} u &= \dots \\ i &= \dots \\ i_{T1} &= \dots \end{aligned}$$

$\alpha < \theta < \pi$

A $\theta = \alpha$ T_1 est amorcé, le courant i circule la maille $A \rightarrow T_1 \rightarrow R \rightarrow B$

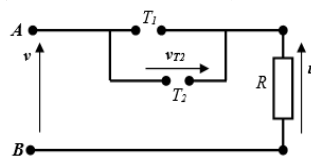


$$\begin{aligned} v_{T1} &= \dots \\ u &= \dots \\ i &= \dots \text{ et } i_{T1} = \dots \end{aligned}$$

T_1 se bloque naturellement en $\theta = \pi$ ($i = \dots$).

$\pi < \theta < \pi + \alpha$

T_1 et T_2 sont bloqués (aucune commande)

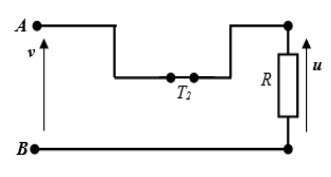


Le thyristor T_2 est susceptible d'être amorcé car $v_{T2} = -v_{T1} = v$ et $v < 0$

$$\begin{aligned} u &= \dots \\ i &= \dots \\ i_{T1} &= \dots \end{aligned}$$

$\pi + \alpha < \theta < 2\pi$

A $\theta = \pi + \alpha$ T_2 est amorcé, le courant i circule la maille : $B \rightarrow R \rightarrow T_2 \rightarrow A$

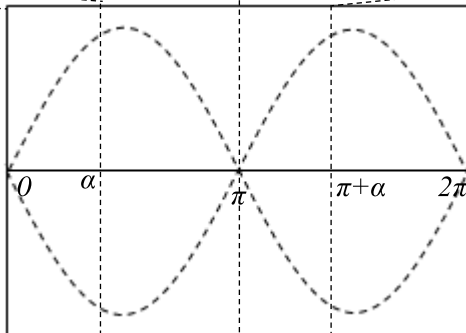


$$\begin{aligned} v_{T1} &= \dots \\ u &= \dots \\ i &= \dots \text{ et } i_{T1} = \dots \end{aligned}$$

T_2 se bloque naturellement en $\theta = 2\pi$ ($i = \dots$).

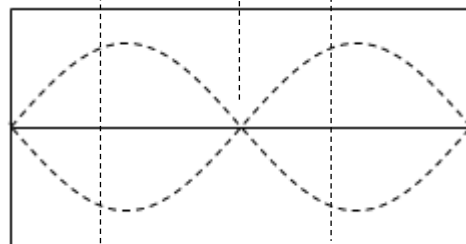
Dessiner les tensions :

- $u(t)$ en rouge
- $v_{T1}(t)$ en bleu



Dessiner les courants :

- $i(t)$ en rouge



Grandeurs caractéristiques

Valeur moyenne de $u(t)$:

$$\langle u \rangle = \dots$$

Valeur efficace de $u(t)$:

$$U = V \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi}}$$

Courant moyen dans un élément :

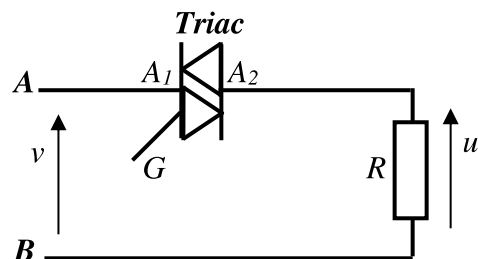
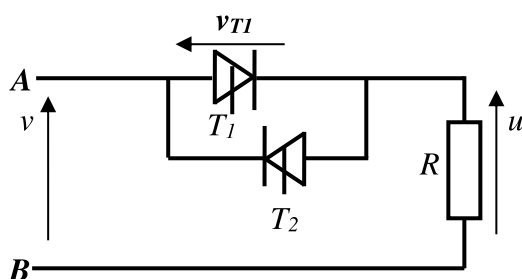
$$\langle i_{T1} \rangle = \langle i_{T2} \rangle$$

Tension maximale supportée par les thyristors :

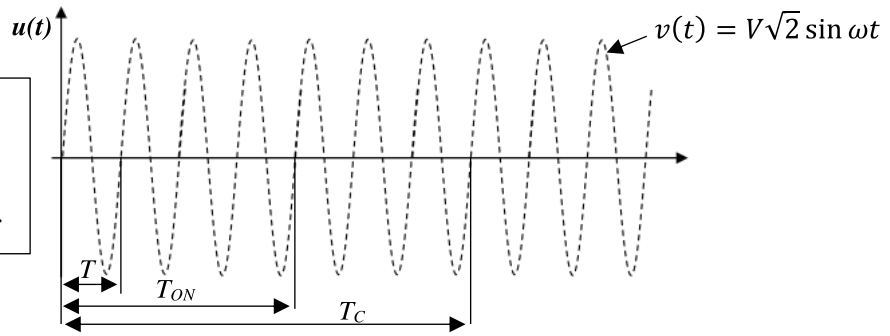
$$v_{T1\max} = v_{T2\max} = \dots$$

Commande par train d'ondes

Dans ce type de gradateur, le signal envoyé sur l'entrée de commande du gradateur est de type TOR.



T : période du réseau
 T_{ON} : Durée du train d'ondes,
 (Temps de conduction)
 T_C : Temps de cycle du gradateur



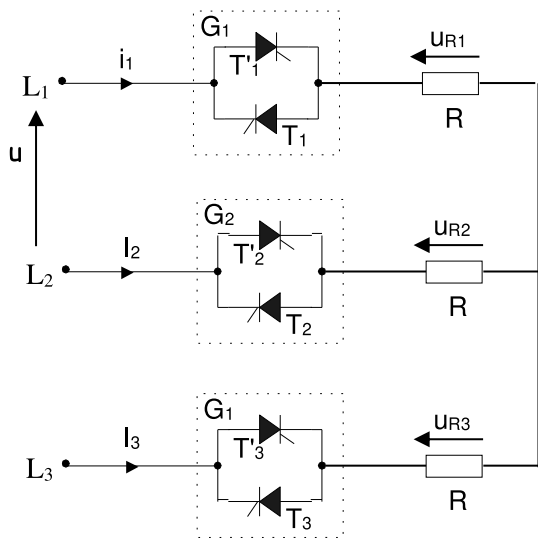
Grandeurs caractéristiques

- Valeur moyenne de la tension u : $\langle u \rangle = \dots$ (Tension alternative)
- Valeur efficace de la tension u : $U = V \sqrt{\alpha}$ avec α (rapport cyclique) = T_{ON}/T_C
- Tension maximale supportée par les éléments : $v_{T1max} = v_{T2max} = \dots$

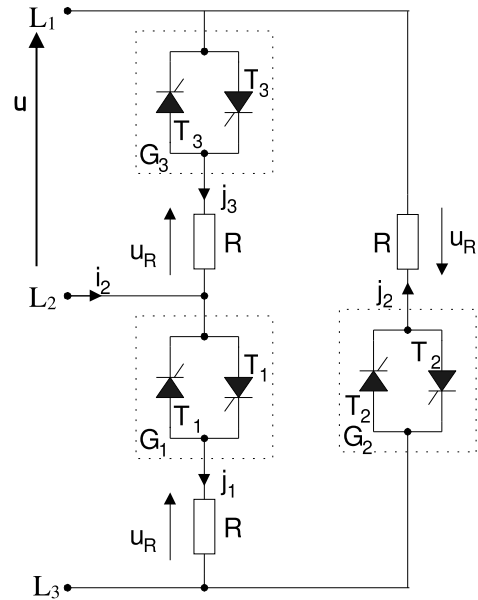
33. Gradateur triphasé

Il existe deux montages de gradateur triphasé :

Montage étoile



Montage triangle



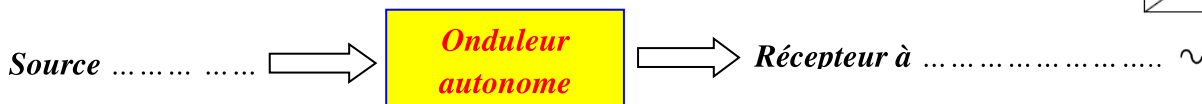
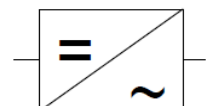
Grandeurs caractéristiques

- Valeur moyenne de la tension u_R : $\langle u_R \rangle = \dots$ (Tension alternative)

	Montage étoile :	Montage triangle :
Valeur efficace de la tension u_R :	$U_R = V \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi}}$	$U_R = U \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi}}$
Tension maximale supportée par les éléments :	$v_{Tmax} = V\sqrt{2}$	$v_{Tmax} = U\sqrt{2}$

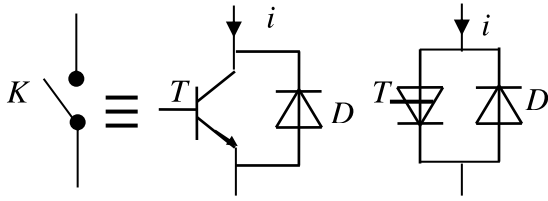
4 Onduleurs autonomes

Un onduleur est un convertisseur continu - alternatif
 Il est autonome lorsqu'il impose sa propre fréquence à la charge.



41. Interrupteurs électroniques

L'interrupteur peut être à transistor (ou thyristor si grande puissance), plus une diode de récupération (indispensable si la charge est inductive).



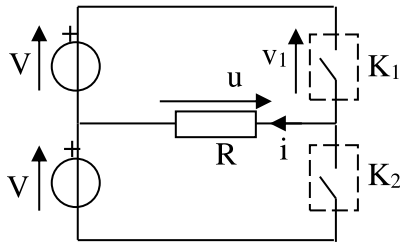
- K ouvert $\leftrightarrow T$ bloqué et D en inverse
- K fermé $\leftrightarrow T$ commandé :
 - si $i > 0$: T conduit
 - si $i < 0$: D conduit

42. Commandes

La commande dans un onduleur peut être : **symétrique**, **décalée** ou **MLI** (Modulation de Largeur d'Impulsion).

43. Onduleur monophasé en demi-pont (à 2 interrupteurs)

Schéma de montage, analyse du fonctionnement et les oscillogrammes

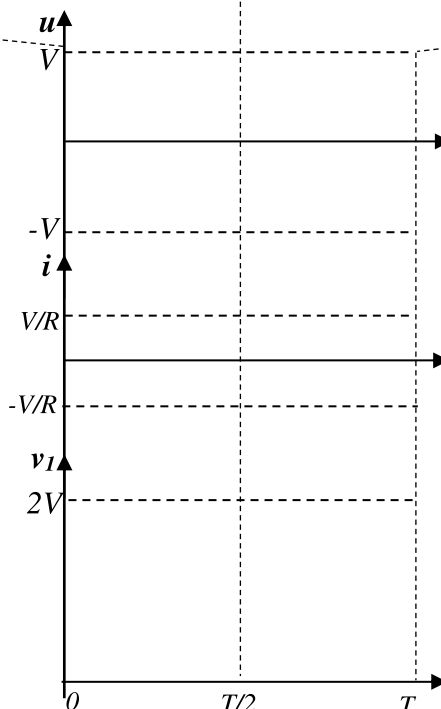


V : tension continue d'entrée du montage.
 u : tension de sortie aux bornes de R .
 v_1 : tension aux bornes de l'interrupteur K_1 .
 R : charge résistive.

Commande symétrique

Principe : Il s'agit d'actionner alternativement les interrupteurs K_1 et K_2 durant des intervalles de temps réguliers.

$0 < t < T/2$	$T/2 < t < T$
<p>K_1 est fermé et K_2 est ouvert</p> <p>$\Rightarrow v_1 = \dots$ d'où $u = \dots$ et $i = \dots$</p>	<p>K_1 est ouvert et K_2 est fermé</p> <p>$\Rightarrow u = \dots ; i = \dots$ et $v_1 = \dots - \dots = \dots$</p>

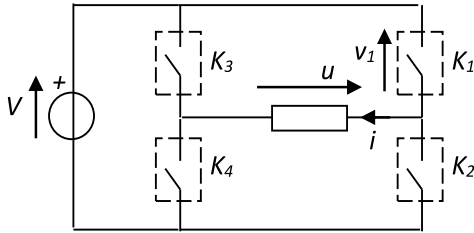


Grandeurs caractéristiques

- Valeur moyenne de la tension u : $\langle u \rangle = 0$.
- Valeur efficace de la tension u : $U = V$.
- Tension maximale supportée par les interrupteurs : $v_1 = 2V$

44. Onduleur monophasé en pont (à 4 interrupteurs)

Schéma de montage, analyse du fonctionnement et les oscillogrammes



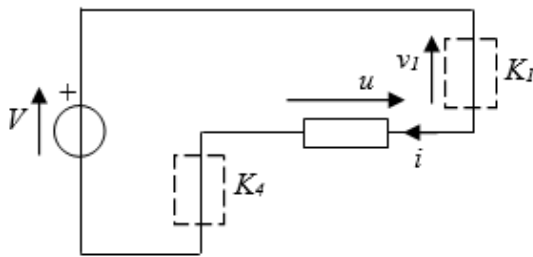
V : tension continue d'entrée du montage.
 u : tension de sortie aux bornes de R .
 v_1 : tension aux bornes de l'interrupteur K_1 .
 R : charge résistive.

Commande symétrique

Principe : Il s'agit d'actionner alternativement les interrupteurs K_1 ; K_4 et K_2 ; K_3 durant des intervalles de temps réguliers. La fermeture des interrupteurs des deux bras est symétrique :

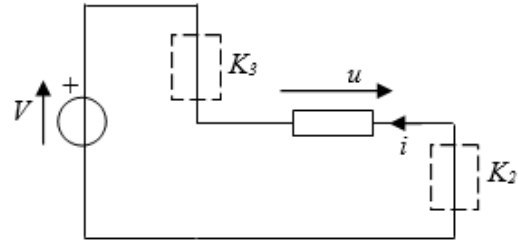
Bras 1	K_1 fermé	K_2 fermé
Bras 2	K_4 fermé	K_3 fermé

$0 < t < T/2$

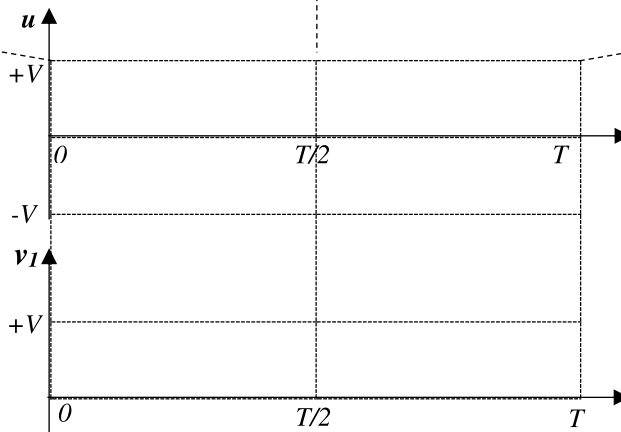


K_1, K_4 sont fermés et K_2, K_3 sont ouverts.
 $\Rightarrow v_1 = v_4 = \dots$ donc $V - u = 0$ d'où $u = \dots$ et $i = \dots$

$T/2 < t < T$



K_2, K_3 sont fermés et K_1, K_4 sont ouverts.
 $\Rightarrow v_2 = v_3 = \dots$ donc $V + u = 0$ d'où $u = \dots$ et $i = \dots$



Grandeurs caractéristiques :

- Valeur moyenne de la tension u : $u = \dots$
- Valeur efficace de la tension u : $U = \dots$
- Tension maximale supportée par les interrupteurs : \dots

Commande décalée (onduleur en pont)

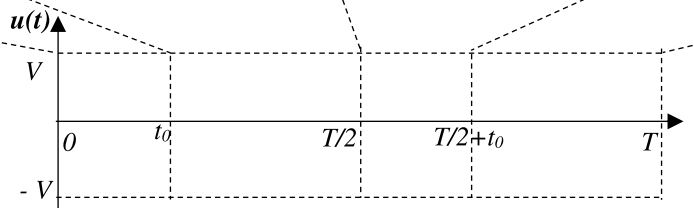
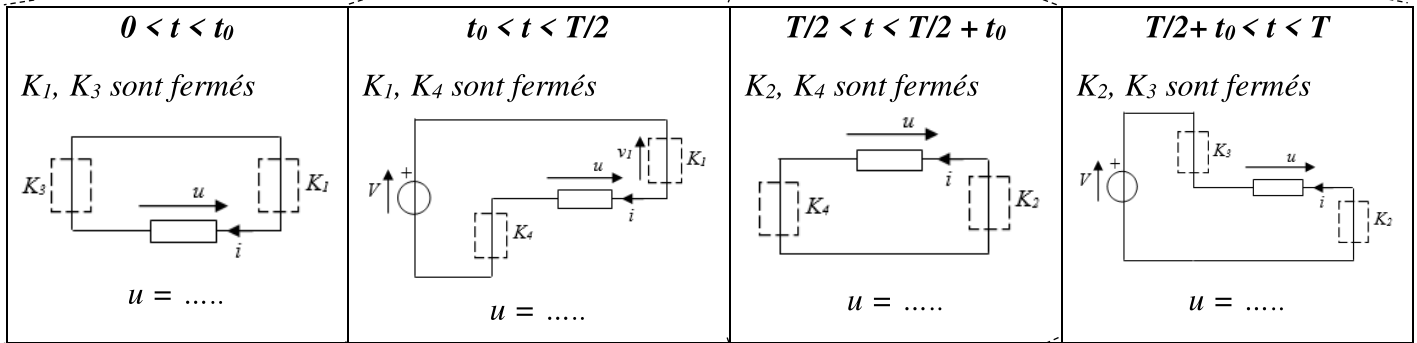
Dans la commande précédente la tension, ainsi que le courant, sont riches en harmoniques ce qui pose des problèmes pour une utilisation avec des moteurs (pertes joules, couples pulsatoires ...).

La commande décalée permet d'éliminer en partie ces harmoniques et améliore donc le convertisseur.

Principe : la fermeture des interrupteurs d'un bras est décalée de l'angle $\alpha = \omega t_0$:

Bras 1	K_1 fermé	K_2 fermé
Bras 2	K_3 fermé	K_4 fermé

$0 \quad t_0 \quad T/2 \quad T/2+t_0 \quad T$



Grandeurs caractéristiques :

- Valeur moyenne de la tension u : $\langle u \rangle = \dots$
- Valeur efficace de la tension u : $U = V \sqrt{1 - \frac{2t_0}{T}} = V \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi}}$
- Tension maximale supportée par les interrupteurs :

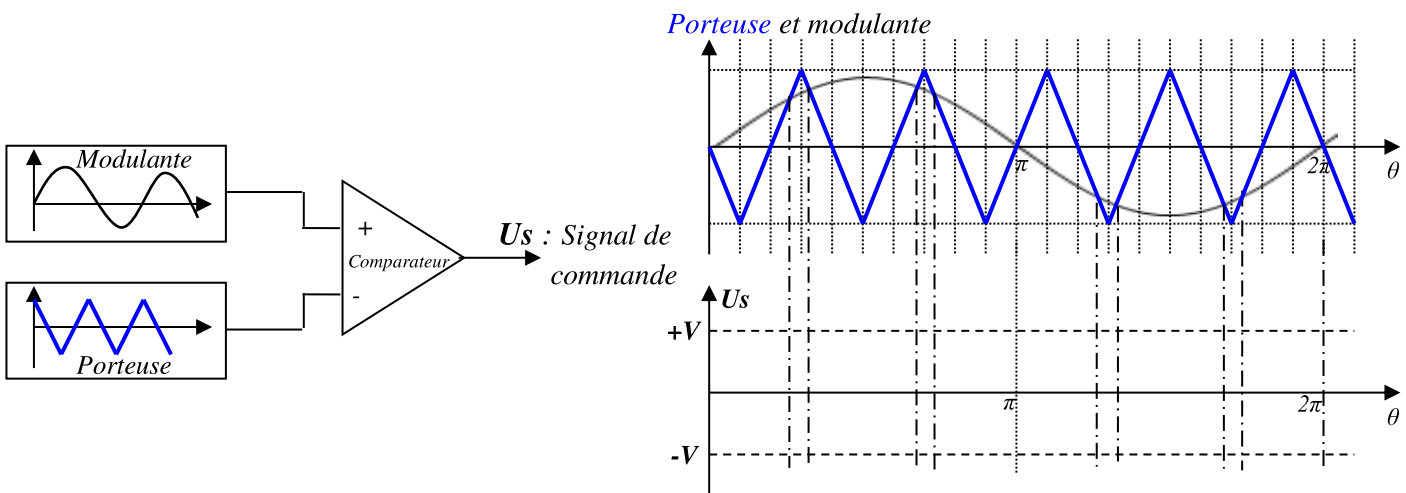
Commande par Modulation de Largeur d'Impulsion MLI ou PWM (Pulse Width Modulation) en anglais

La tension aux bornes de la charge est fragmentée en plusieurs impulsions de tension (négative et positive). Cette fragmentation permet si elle est savamment calculée d'éliminer les harmoniques gênants. L'allure de la tension MLI permet de se rendre compte du principe de cette commande.

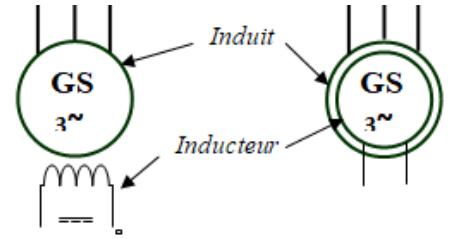
Pour obtenir la tension de commande des transistors, on compare un signal triangulaire appelé porteuse au signal modulant sinusoïdal de fréquence beaucoup plus faible.

Principe de commande MLI du bras $K_1 - K_2$:

L'onde modulante, est comparée à l'onde porteuse et à la sortie du comparateur on obtient la tension de commande U_s .



La machine synchrone est un convertisseur réversible. Elle peut fonctionner soit en génératrice (.....) soit en moteur (.....).



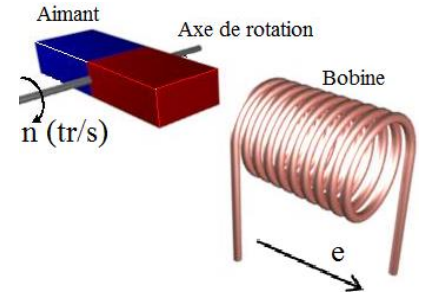
1 Principe de l'alternateur

Un aimant (inducteur) tourne à la fréquence n , la bobine (induit) est traversée par un flux variable $\Phi(t)$ dû à l'aimant d'où la création d'une f.é.m. induite : $e(t) = -N_s \frac{d\Phi(t)}{dt}$

La fréquence de cette f.é.m. est telle que : $f = n$, soit $\omega = \Omega$.

Avec $\left\{ \begin{array}{l} \Omega : \text{vitesse angulaire de rotation du rotor (aimant)} \\ \omega : \text{la pulsation de la f.é.m. sinusoïdale induite, en rad/s.} \end{array} \right.$

Nous venons de donner le principe de fonctionnement d'un alternateur.



Remarque :

Si l'aimant possède 4 pôles (2 paires de pôles), la bobine sera le siège d'une f.é.m. de fréquence $f = 2n$. D'une façon générale : $f = pn$ avec p est le nombre de paires de pôles et n vitesse de rotation en tr/s.

2 Constitution

L'alternateur comprend deux parties principales : l'inducteur et l'induit

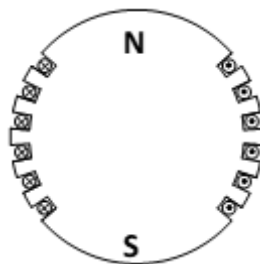
2.1. L'inducteur

Il a pour rôle de créer un champ magnétique tournant à l'aide d'un rotor magnétisant mis en rotation.

L'inducteur comporte $2.p$ pôles (p : paires de pôles).

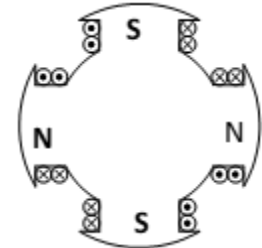
Il existe 2 types de rotors :

Rotor à pôles lisses



Rotor à pôles lisses $p = 1$

Rotor à pôles saillants

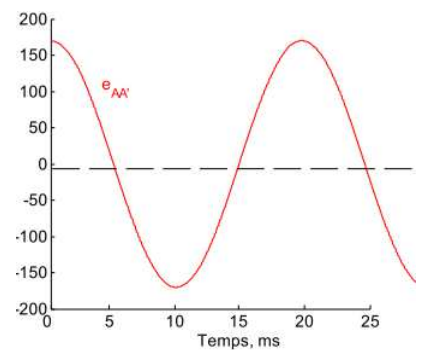
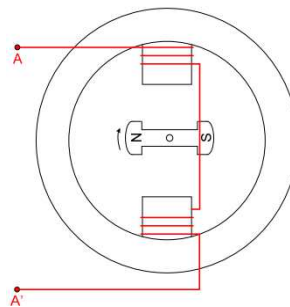


Rotor à pôles saillants $p = 2$

2.2. L'induit

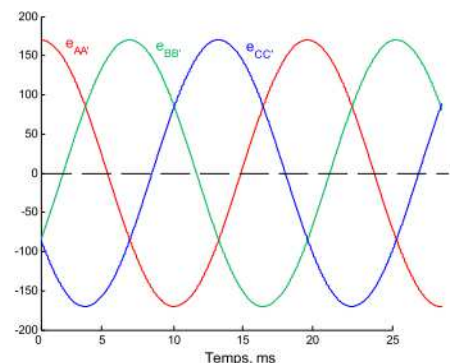
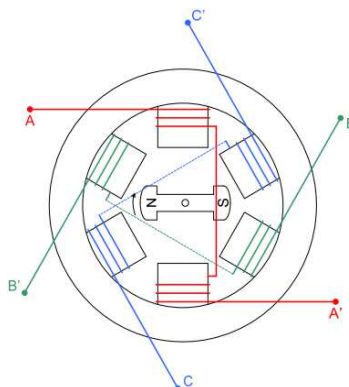
Alternateur monophasé

L'enroulement d'induit, fixe, est le siège d'une tension induite sinusoïdale, sa fréquence est déterminée par la vitesse de rotation de la machine d'entraînement (dans ce cas, 3000 tr/min, d'où $f = 50$ Hz et $\Omega = 377$ rad/s).



Alternateur triphasé

Trois enroulements (phases) identiques et fixes sont décalés dans l'espace, l'un par rapport à l'autre, de 120° . Les tensions induites sont identiques mais déphasées dans le temps de 120° . Elles forment un système triphasé et équilibré de tensions.



3 Caractéristiques de l'alternateur

31. Fréquence des f.é.m. induites

Les enroulements de l'induit sont soumis à un champ magnétique tournant à la fréquence n dite fréquence de synchronisme. Il apparaît donc aux bornes des enroulements de l'induit des f.é.m. induites de fréquence f telles que : $f = \dots\dots\dots$ Avec :

- p : nombre de paires de pôles
- n : vitesse de rotation du champ tournant en tr/s
- f : fréquence des f.é.m. induites en Hz

32. Valeur efficace de la f.é.m. induite par un enroulement

Chaque enroulement génère une f.é.m. induite $e(t) = -N_s \frac{d\Phi(t)}{dt}$, dont la valeur efficace s'exprime :

$$E = \dots\dots\dots = \dots\dots\dots \text{ avec :}$$

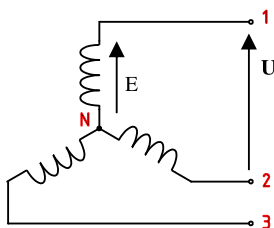
- K : coefficient de K_{app} qui ne dépend que des caractéristiques technologiques de l'alternateur.
- N : nombre de conducteurs actifs par enroulement.
- Φ_{max} : flux utile maximal sous un pôle en Weber (Wb).

33. Couplage des alternateurs triphasés

La f.é.m. induite définie précédemment est générée par chacun des enroulements. La formule précédente donne donc la valeur efficace d'une tension simple si les enroulements sont couplés en étoile, et la valeur d'une tension composée s'ils sont couplés en triangle.

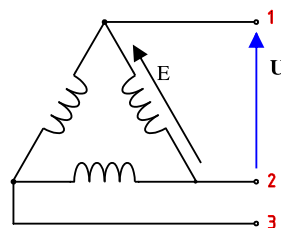
Exemple : A vide, si $E = 230 \text{ V}$

Couplage en étoile



$$U = E \cdot \sqrt{3} = 400 \text{ V}$$

Couplage en triangle



$$U = E = 230 \text{ V}$$

34. Excitation des alternateurs

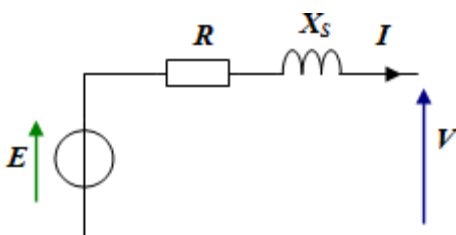
Lorsque l'alternateur est à aimants permanents, il n'a pas besoin d'être excité. Lorsque l'inducteur est constitué d'enroulements, ils doivent être traversés par des courants continus fournis par :

- Une source extérieure reliée au rotor par un système de bagues et de balais.
- L'induit lui-même : une partie des courants triphasés fournis par l'induit sont redressés à l'aide d'un pont de diodes afin de pouvoir alimenter directement l'inducteur : l'alternateur est alors dit **auto-excité**.

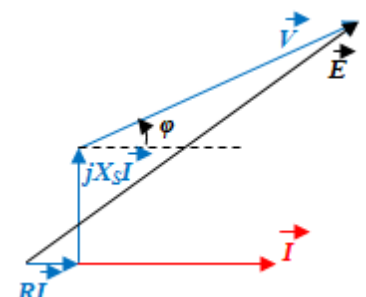
4 Fonctionnement en charge

41. Schéma équivalent. Equation. Diagramme

Schéma équivalent



Diagramme



Equations : $\underline{E} = \underline{R} \cdot \underline{I} + j X_s \cdot \underline{I} + \underline{V}$ soit $\underline{V} = \dots\dots\dots$

42. Détermination de la réactance synchrone X_S

Bilan des pertes de puissance par les éléments du modèle électrique équivalent, à l'aide de deux essais :

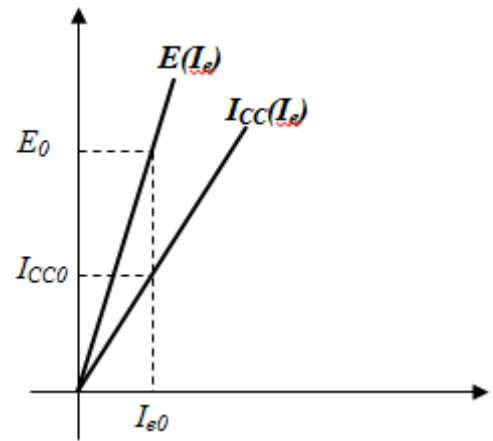
- Essai à vide $E = f(I_e)$;
- Essai en court-circuit $I_{cc} = f(I_e)$.

On a alors les deux caractéristiques $I_{cc} = f(I_e)$ et $E = f(I_e)$.

Pour un courant d'excitation donné I_{e0} (zone linéaire), on connaît donc : I_{cc0} et E_0 , on en déduit X_S .

$$Z = \dots\dots\dots \text{ et } X_S = \dots\dots\dots$$

La réactance X_S est généralement très grande devant la résistance R d'un enroulement. d'où : $Z = E_0 / I_{cc0} \approx X_S$



43. Bilan des puissances. Rendement.



Puissance reçue

L'alternateur reçoit une puissance mécanique P_M qui lui est fournie par le moteur d'entraînement :

$$P_M = \dots\dots\dots$$

Puissance restituée

Il restitue une partie de cette puissance sous la forme de puissance électrique P qui est reçue par la charge :

$$P = \dots\dots\dots$$

Pertes ne dépendant pas de la charge appelées pertes « constantes »

Les pertes mécaniques p_m dépendent de la fréquence de rotation ; les pertes p_{fs} dans le fer dépendent de la fréquence et du flux dans la machine. Pour une machine synchrone utilisée à fréquence et tension constantes, elles varient peu entre le fonctionnement à vide et le fonctionnement à pleine charge.

On les considère donc comme constantes.

Pertes par effet Joule

Pertes Joule Stator

Si r est la résistance d'une phase du stator :

- $P_{js} = \dots\dots\dots$ pour le couplage étoile
- $P_{js} = \dots\dots\dots$ pour le couplage triangle

Si R est la résistance mesurée entre phases du stator couplé :

- $P_{js} = \dots\dots\dots$ quel que soit le couplage.

Pertes Joule Inducteur

$$P_{je} = \dots\dots\dots$$

U_e : la tension continue aux bornes de l'inducteur en V ;

I_e : courant continu d'excitation en A..

Expression du rendement

- Si l'alternateur est auto-excité, c'est-à-dire s'il ne reçoit de puissance que du moteur qui l'entraîne, le rendement est alors égal à :

$$\eta = \frac{\sqrt{3} U I \cos \varphi}{C_M \Omega}$$

- Si l'alternateur n'est pas auto-excité, il faut ajouter à la puissance mécanique reçue, la puissance p_{je} qui a été fournie au circuit d'excitation.

Dans le cas général, nous pouvons aussi exprimer le rendement en fonction des différentes pertes de puissance :

$$\eta = \frac{\sqrt{3} U I \cos \varphi}{\sqrt{3} U I \cos \varphi + p_m + p_{fs} + p_{je} + p_{js}}$$

5 Moteur synchrone. Réversibilité de l'alternateur

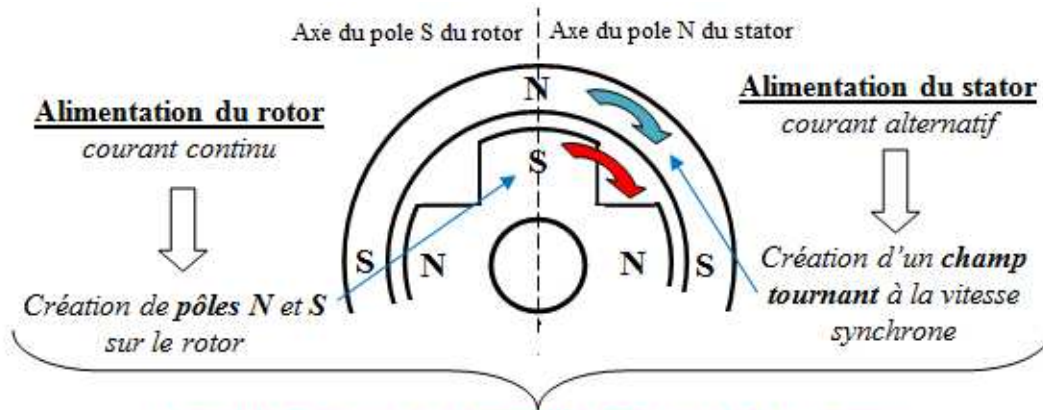
L'alternateur, couplé sur le réseau de distribution, fonctionne à vide. Si l'on supprime l'alimentation du moteur d'entraînement, le groupe continue toujours à tourner, l'alternateur est converti en moteur.

Puisque le moteur tourne à la vitesse de synchronisme $n_s = f/p$, on l'appelle **moteur synchrone**.

La f.é.m. devient f.c.é.m et garde la même expression.

51. Fonctionnement

Les 3 enroulements statoriques créent un **champ magnétique**, sa vitesse de rotation $n_s = f/p$ est nommée vitesse de synchrone.

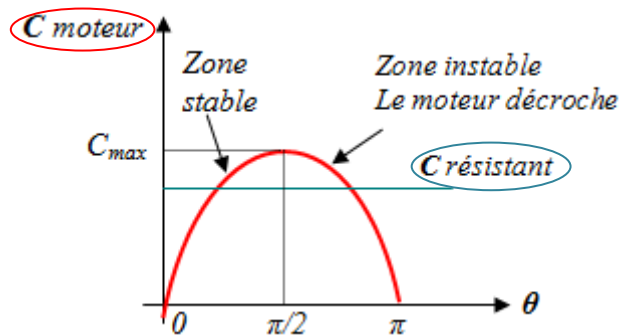
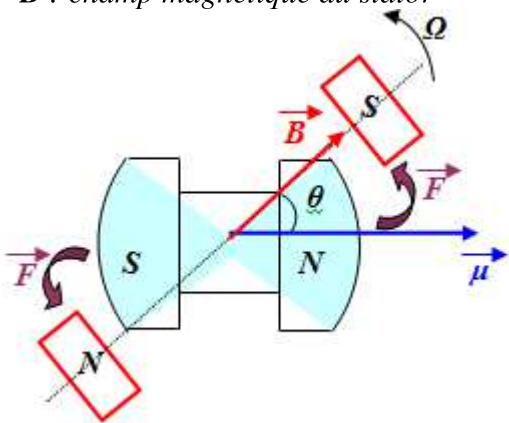


Les pôles **S** du rotor sont **entraînés** par les pôles **N** du stator.
Le rotor tourne donc à la vitesse **synchrone**.

52. Couple électromagnétique

La rotation du système est assurée par le couple : $C_{em} = \mu \cdot B \cdot \sin \theta = C_{max} \cdot \sin \theta$

- μ : moment magnétique du rotor
- B : champ magnétique du stator

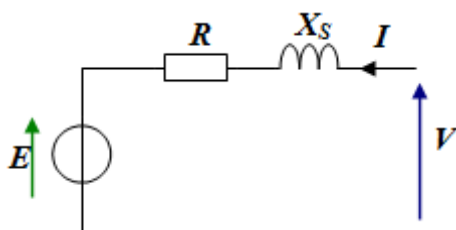


L'évolution du couple en fonction de θ :

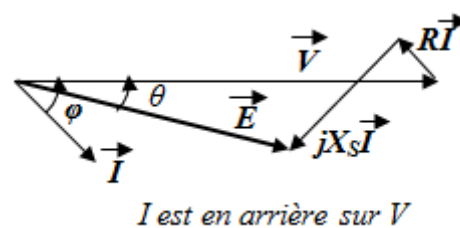
- Si $\theta = 0 \rightarrow C = 0 \rightarrow$ moteur est en arrêt
- Si $0 < \theta < \pi/2 \rightarrow$
Si C_r augmente $\rightarrow \theta$ augmente $\rightarrow C_m$ augmente
 \rightarrow Moteur en marche (fonctionnement statique stable).
- Si $\pi/2 < \theta < \pi \rightarrow$
Si C_r augmente $\rightarrow \theta$ augmente $\rightarrow C_m$ diminue
 \rightarrow Moteur décroche.

53. Schéma équivalent. Equation. Diagramme

Schéma équivalent



Diagramme



Equations : $\underline{E} = \dots\dots\dots$ Soit $\underline{V} = \dots\dots\dots$

54. Bilan des puissances. Rendement.

Bilan des pertes de puissance

Puissance absorbée

L'alternateur reçoit une puissance électrique P qui lui est fournie par la source d'alimentation

$$P = \dots\dots\dots$$

Puissance utile

Il restitue une partie de cette puissance sous la forme de puissance mécanique P_U qui est reçue par la charge :

$$P_U = \dots\dots\dots$$



Expression du rendement

Dans le cas général, nous pouvons aussi exprimer le rendement en fonction des différentes pertes de puissance :

$$\eta = \frac{\sqrt{3} U I \cos \varphi - (p_m + p_f + p_{je} + p_{js})}{\sqrt{3} U I \cos \varphi}$$

55. Avantages

- La machine synchrone est plus facile à réaliser et plus robuste que le moteur à courant continu.
- Son rendement est proche de 99%.
- **On peut régler son facteur de puissance $\cos \varphi$ en modifiant le courant d'excitation I_e .**

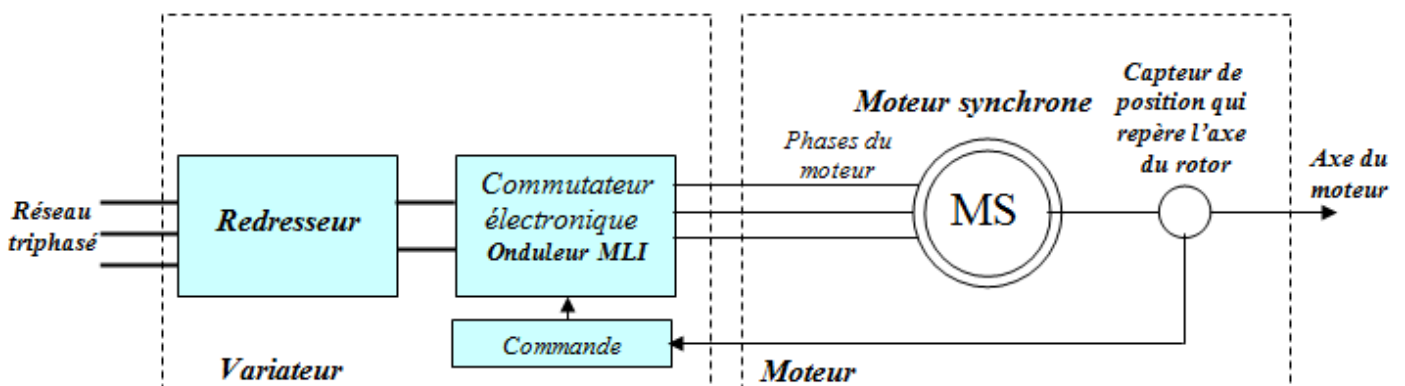
56. Inconvénients

- Un moteur auxiliaire de démarrage est souvent nécessaire.
- Il faut une excitation, c'est-à-dire une deuxième source d'énergie.
- Si le couple résistant dépasse une certaine limite, le moteur décroche et s'arrête.

6 Moteur synchrone autopiloté

Les moteurs synchrones autopilotés sont aussi appelés moteurs *autosynchrones*.

61. Schéma de principe

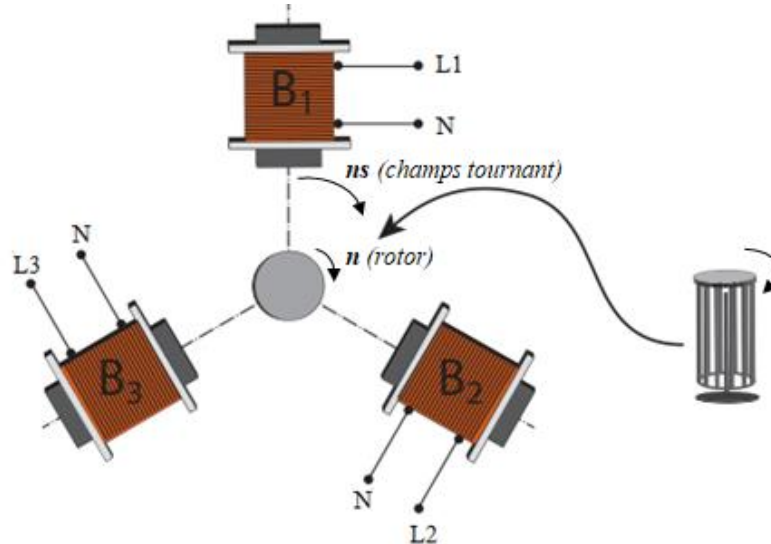


62. Fonctionnement

Le capteur (*codeur* ou *resolver*) détecte la position exacte du rotor et permet à l'onduleur (convertisseur de fréquence), de maintenir un angle θ de 90° entre le champ tournant statorique B et le champ rotorique μ , de façon à ce que le couple moteur puisse toujours être *maximal*. Il n'y a plus possibilité de décrochage. Le capteur donne également l'information " *vitesse* ".

Le moteur asynchrone est un convertisseur Il est l'un des principaux actionneurs électriques utilisés dans l'industrie. D'une puissance allant de moins d'un KW, à plusieurs dizaines de MW. Il est robuste et d'un entretien limité (pas de contact glissants). Ce qui réduit l'usure et permet un fonctionnement sûr (sans étincelle).

1 Principe du moteur asynchrone triphasé



Les 3 bobines (enroulements) statoriques (B_1 , B_2 et B_3) de p paires de pôles, alimentées par un système de tensions triphasées de fréquence f , créent un tournant à la vitesse $ns = f/p$ nommée **vitesse de synchronisme**.

Le rotor est constitué de **barres d'aluminium** qui sont reliées à leur extrémité par deux anneaux conducteurs et constituent une "cage d'écureuil". Cette cage est balayée par le champ magnétique tournant. Les conducteurs sont alors traversés par des courants induits.

L'interaction de ces courants et du champ magnétique tournant crée un qui provoque la rotation du **rotor** à une vitesse n légèrement à celle du champ tournant ns d'où le terme **asynchrone**.

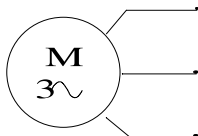
2 Constitution

Les deux principales parties d'un moteur asynchrone triphasé sont :

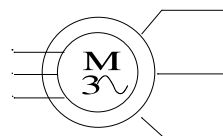
- Le stator (identique à celui de la machine synchrone) qui produit un champ magnétique tournant ;
- Le rotor qui, entraîné par ce champs tournant, produit de l'énergie mécanique.

21. Symbole normalisé

Moteur à rotor à cage



Moteur à rotor bobiné.



22. Stator (partie fixe du moteur)

Il est identique à celui des machines synchrones c'est à dire constitué de 3 enroulements, formés de conducteurs logés dans des encoches, qui peuvent être couplés en ou en selon le réseau d'alimentation.

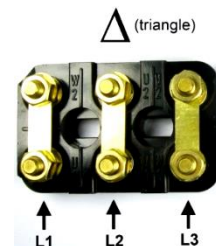
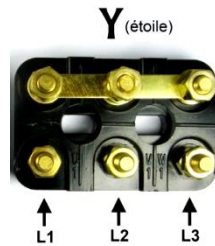
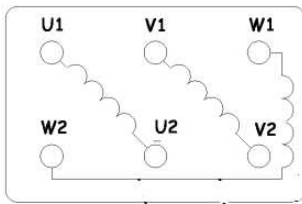
Couplage sur le réseau

Sur la plaque signalétique d'un moteur asynchrone, il apparaît une indication concernant les tensions (Exemple : 230V/400V). Cela signifie que, quel que soit le réseau, chaque enroulement doit être soumis, au

régime nominal, à la tension correspondant à la valeur indiquée **la plus faible** (ici **230 V**). En fonction du réseau, il faudra donc réaliser **le couplage adapté**

Schéma de branchement

Les moteurs triphasés possèdent 3 enroulements qui sont reliés à **6 bornes repérées U₁, V₁, W₁ et U₂, V₂, W₂**; le positionnement de trois barrettes permet d'alimenter le moteur sous deux tensions différentes.



23. Rotor (partie mobile du moteur)

Le rotor n'est relié à aucune alimentation. Il tourne à la vitesse de rotation **n**. Il existe 2 possibilités :

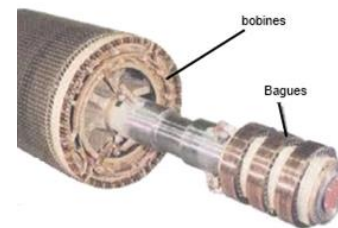
Rotor à cage d'écureuil

Il porte un ensemble de barres conductrices, très souvent en aluminium, logées dans un empilement de tôles. Les extrémités des barres sont réunies par deux couronnes conductrices.



Rotor bobiné

Les enroulements (couplés en étoile) sont généralement accessibles par l'intermédiaire de **3 bagues** et de **3 balais**, permettant ainsi de modifier les caractéristiques de la machine.



3 Glissement

Le rotor tourne à la vitesse **n** plus petite que la vitesse de synchronisme **ns**.

On dit que le rotor « glisse » par rapport au champ tournant. Ce glissement **g** va dépendre de la charge.

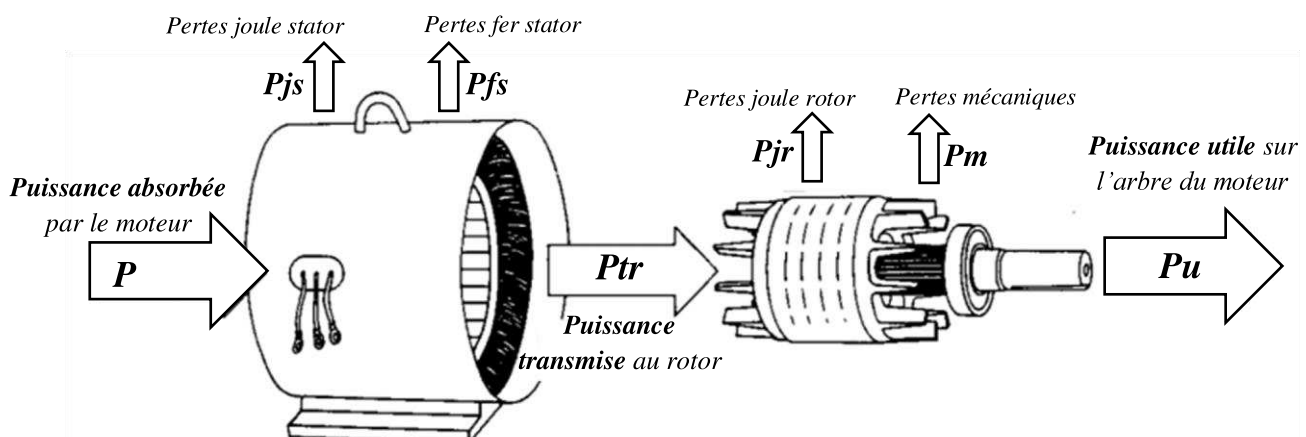
$$g = \frac{ns - n}{ns} = \frac{ns - n}{ns} \quad \text{Avec}$$

- **ns** : vitesse de synchronisme du champ tournant (tr/s)
- **n** : vitesse de rotation du rotor (tr/s)
- **ng** : vitesse de glissement (tr/s) $ng = ns - n = g \cdot ns$

$$\text{Soit : } n = (1 - g) \cdot ns \quad \begin{cases} n = 0 \rightarrow g = 1 = 100\% \\ n = ns \rightarrow g = 0 = 0\% \end{cases}$$

Quand un moteur tourne normalement (vitesse nominale), le glissement **g** est compris entre **2 %** et **5 %**

4 Bilan des puissances et rendement



41. Puissance absorbée et puissance utile



42. Puissance transmise au rotor

Cette puissance est transmise au rotor par le couple électromagnétique :

$P_{tr} = \dots\dots\dots = \dots\dots\dots$ Avec C_e : moment du couple électromagnétique en Nm.
 Ω_s : vitesse angulaire synchronisme ($2 \cdot \pi \cdot n_s$) en rad/s.

Puissance sur le rotor : $P_r = P_{tr} - P_{jr} = C_e \Omega$ avec $\Omega = 2 \cdot \pi \cdot n$ vitesse angulaire rotor en rad/s.

43. Pertes constantes

Les pertes mécaniques P_m dépendent de la fréquence de rotation ; les pertes dans le fer P_{fs} dépendent de la fréquence et du flux dans la machine. Pour un moteur asynchrone utilisé à fréquence et tension constantes, elles varient peu entre le fonctionnement à vide et le fonctionnement à pleine charge. On les considère donc comme constantes.

44. Pertes joule

Pertes Joule Stator

Si r est la résistance d'une phase du stator :

$P_{js} = \dots\dots\dots$ pour le couplage étoile

$P_{js} = \dots\dots\dots$ pour le couplage triangle

Si R est la résistance entre phases du stator couplé et I l'intensité en ligne alors : $P_{js} = \dots\dots\dots$ quel que soit le couplage.

Pertes Joule Rotor

$P_{jr} = \dots\dots\dots$

Avec P_{tr} : puissance transmise au rotor

g : glissement.

45. Rendement

$$\eta = \frac{P_u}{P} = \frac{C_u \Omega}{\sqrt{3UI \cos \varphi}} = \frac{\dots\dots\dots}{\dots\dots\dots}$$

5 Caractéristiques

51. Fonctionnement à vide

A vide le moteur n'entraîne pas de charge.

Conséquence : le glissement est nul et le moteur tourne à la vitesse de synchronisme : $g = 0$ et donc $n = n_s$

La puissance absorbée à vide $P_0 = P_{fs} + P_m + P_{js0}$ car $P_{u0} = 0$ et $P_{jr0} = 0$.

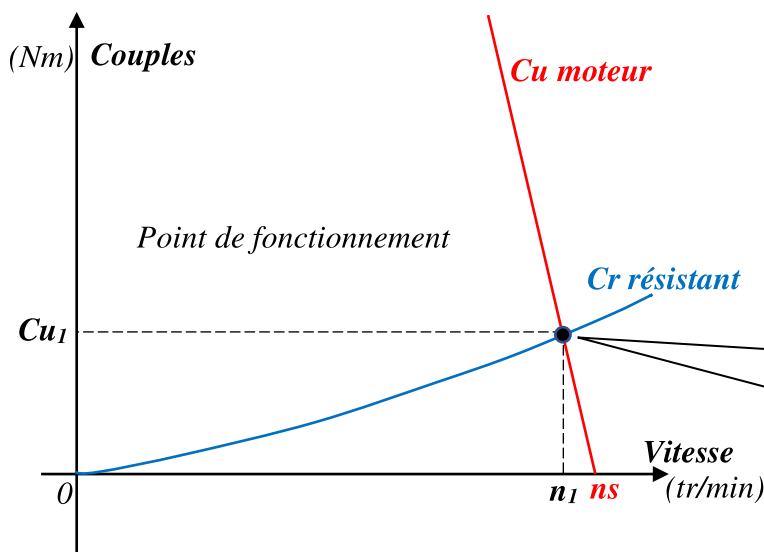
52. Fonctionnement en charge

Le moteur est maintenant chargé, c'est-à-dire que l'arbre de ce dernier entraîne une charge résistante qui s'oppose au mouvement du rotor.

En régime permanent, ou régime établi : $C_u = C_r$.

Caractéristique mécanique $Cu = f(n)$

La caractéristique mécanique Cu du moteur dans sa partie utile est un **segment de droite** (d'équation de forme : $y = a.x + b$).



Pour tracer $Cu(n)$, il suffit de 2 points :

- Premier point donné par l'étude d'un cas précis : $Cu = a.n + b$
- Le second se déduit de l'essai à vide : $0 = a.ns + b$

Le point de fonctionnement ($Cu_1 ; n_1$) correspond au fonctionnement en charge du moteur et permettant de calculer très facilement le glissement et la puissance utile dans ce cas bien précis.

6 Plaque signalétique

La plaque signalétique c'est la carte d'identité d'un moteur, tous les renseignements utiles y sont répertoriés. Il est intéressant de connaître la signification des différents symboles, chiffres, abréviation.

* LEROY SOMER		MOT. 3~ LS 80 L T		N° BJ 002 kg 9	
IP 55 I cl.F 40°C S1					
V	Hz	min ⁻¹	kW	cos φ	A
Δ 220	50	2780	0,75	0,86	3,3
Y 380					1,9
Δ 230	50	2800	0,75	0,83	3,3
Y 400					1,9
Δ 240	50	2825	0,75	0,80	3,3
Y 415	**				1,9

- 1- Tension triangle.
- 2- Tension étoile.
- 3- Fréquence nominale.
- 4- Vitesse nominale de rotation.
- 5- Puissance utile.
- 6- Courant nominal en ligne triangle.
- 7- Courant nominal en ligne étoile.

7 Démarrage des moteurs asynchrones triphasés

7.1. Problème posé par le démarrage

Lors de la mise sous tension d'un moteur, l'appel de courant au démarrage I_d sur le réseau est souvent important (4 à 8. In).

Cette forte intensité peut provoquer une **chute de tension** en ligne (limitée par la norme) pouvant détériorer les appareils raccordés sur cette dernière. C'est le cas du démarrage direct.

Le compromis est donc **limiter le courant pendant le démarrage** tout en conservant un **couple moteur suffisant** pour assurer le démarrage

Pour ce faire, (si le moteur est alimenté par le réseau à fréquence industrielle 50 Hz) on peut agir soit sur le **stator** (moteur à cage) ou soit sur le **rotor** (moteur à rotor bobiné) :

- **Action sur le stator** : consiste à réduire la **tension aux bornes des enroulements statoriques** au démarrage du moteur cela réduit le courant de démarrage ($I = k.V$).
Inconvénient : le couple moteur ($Cu = k.V^2$) est réduit dans le même rapport.
- **Action sur le rotor** : consiste à augmenter la **résistance rotorique** au démarrage cela permet une réduction du courant de démarrage et d'une augmentation du couple de démarrage (avantage).

72. Démarrage direct

Principe

C'est le mode de démarrage le plus simple dans lequel le stator est directement couplé sur le réseau.

Le moteur démarre sur ses caractéristiques naturelles.

Ce démarrage est utilisé lorsque le courant à la mise sous tension ne perturbe pas le réseau (chutes de tension dans les câbles).

Courbes

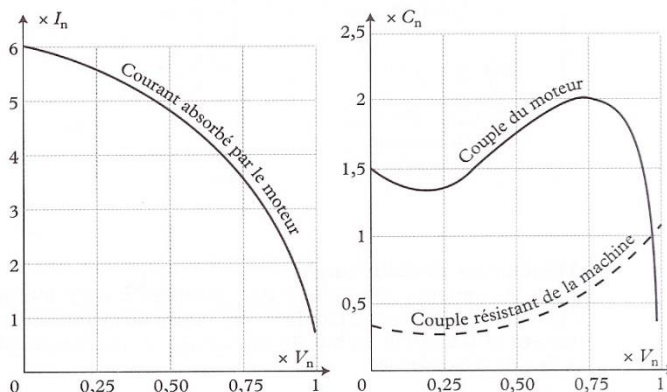
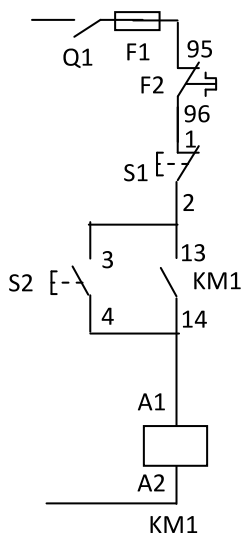
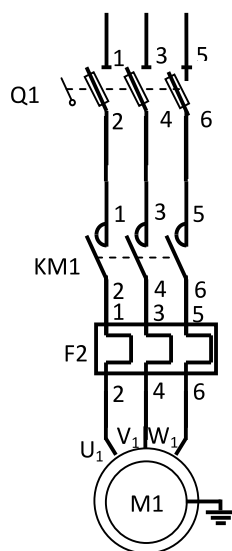


Schéma d'un démarreur direct 1 sens de marche

Circuit de commande



Circuit de puissance



Fonctionnement

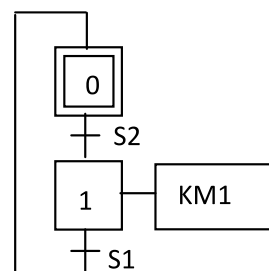
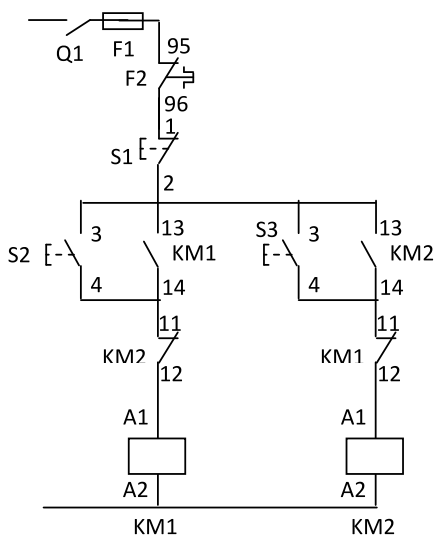
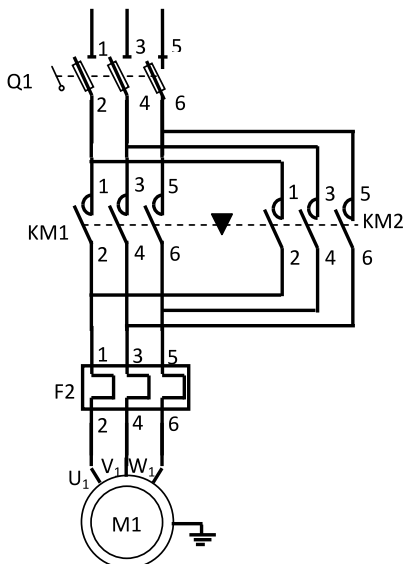


Schéma d'un démarreur direct 2 sens de marche

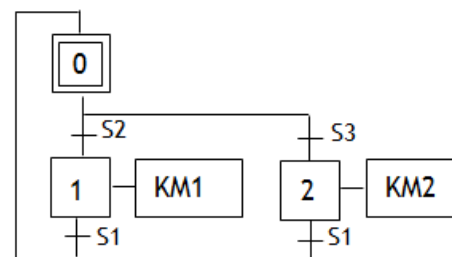
Circuit de commande



Circuit de puissance



Fonctionnement



73. Démarrage étoile-triangle

Courbes

Principe

Ce démarrage consiste à coupler le stator en étoile pendant le démarrage, puis à rétablir le couplage en triangle. Il se fait en 2 temps :

- Premier temps : On démarre en étoile, chaque enroulement reçoit une tension $\sqrt{3}$ fois inférieure à sa tension nominale. **Conséquence** : l'intensité absorbée est divisée par 3.
- Second temps : 2 à 3 secondes après, on bascule en triangle puis on y reste. **Inconvénient** : le couple au démarrage est également divisé par 3 !

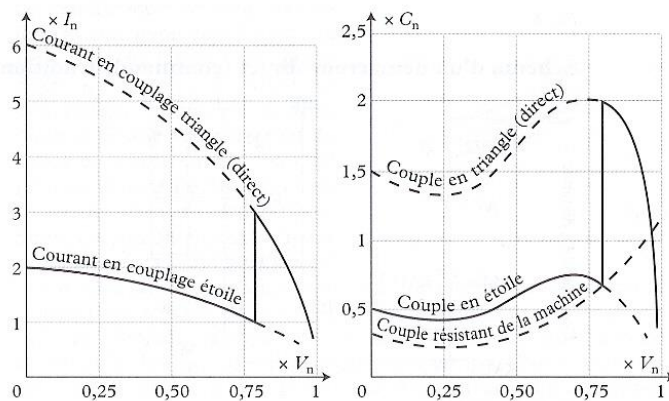
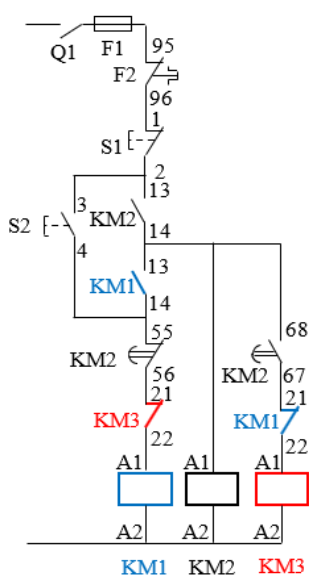
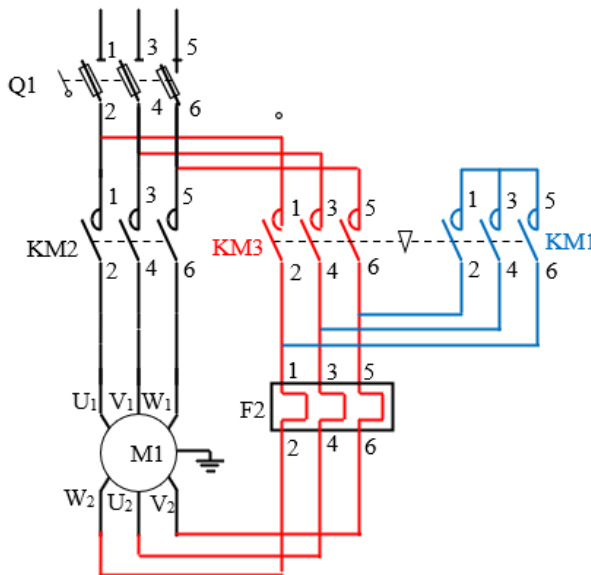


Schéma d'un démarreur étoile / triangle

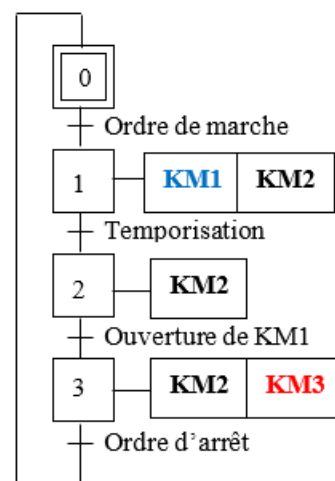
Circuit de commande



Circuit de puissance



Fonctionnement



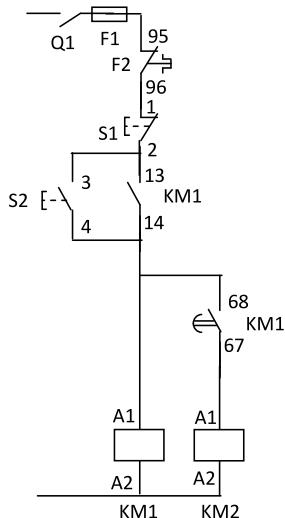
74. Démarrage statorique

Principe

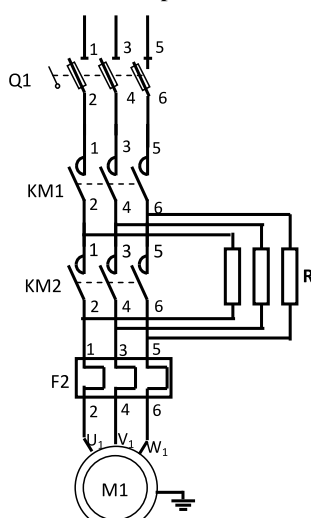
Le démarrage statorique consiste à insérer, dans un premier temps, des résistances en série avec l'enroulement statorique afin de limiter les courants statoriques et ainsi réduire l'appel d'intensité. Dans un deuxième temps on court-circuite ces résistances. Le démarrage est terminé.

Schéma d'un démarreur statorique

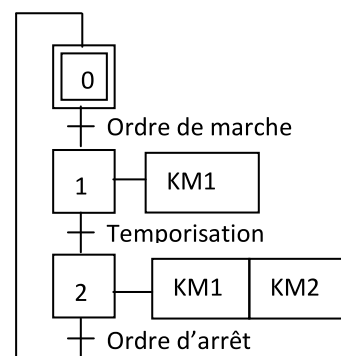
Circuit de commande



Circuit de puissance



Fonctionnement



75. Démarrage par gradateur de tension (démarreur électronique)

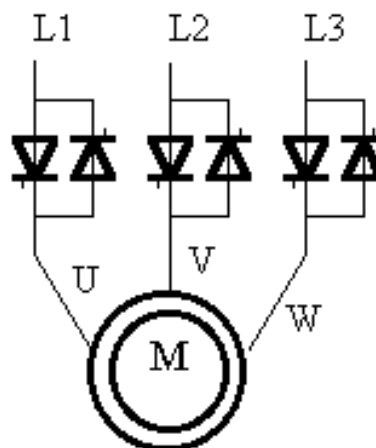
Principe

Le moteur asynchrone triphasé est alimenté par l'intermédiaire d'un gradateur qui provoque la montée progressive de la tension.

On peut réduire l'intensité de démarrage à une valeur précise en agissant sur l'angle de commande des thyristors.

Pour limiter l'appel de courant au démarrage, on réduit la tension efficace ce qui limite le couple moteur au démarrage. On doit donc s'assurer en permanence que le couple de démarrage soit supérieur au couple résistant du système à entraîner.

Documentation technique d'un démarreur progressif LH4 Télémécanique

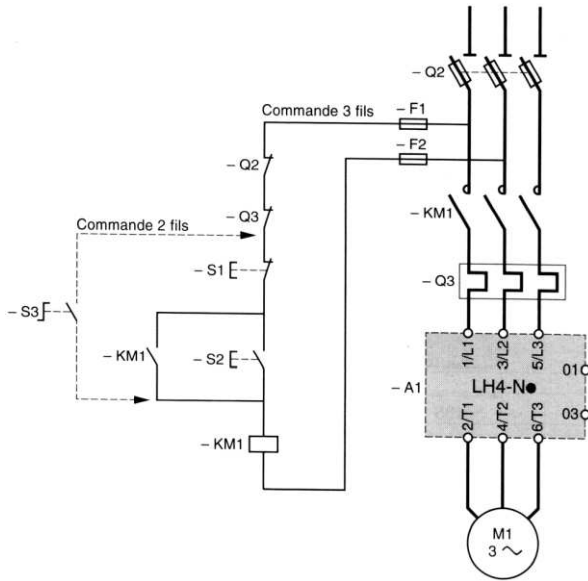


Démarrateurs progressifs de 1,1 à 11 kW

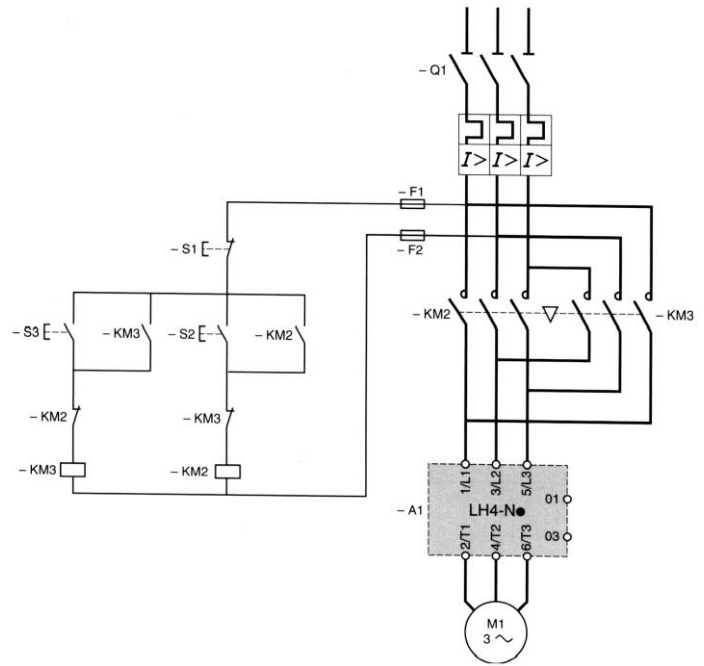
Réseau Tension d'alimentation	Moteur Puissance indiquée sur plaque		Démarreur (1) Courant assigné d'emploi	Référence	Masse
	Triphasé kW	Monophasé kW			
V			A		kg
208...240 50/60 Hz	1,1	0,75	6	LH4-N106LU7	0,300
	2,2	1,5	12	LH4-N112LU7	0,300
	5,5	3	22	LH4-N125LU7	0,500
380...415 50/60 Hz triphasé	2,2	–	6	LH4-N106QN7	0,300
	5,5	–	12	LH4-N112QN7	0,300
	11	–	22	LH4-N125QN7	0,500
440...480 50/60 Hz triphasé	3	–	6	LH4-N106RT7	0,300
	5,5	–	12	LH4-N112RT7	0,300
	11	–	22	LH4-N125RT7	0,500

Schémas développés conseillés

1 sens de marche



2 sens de marche



Choix d'un démarreur progressif

Le choix d'un **démarreur** se fait essentiellement en fonction :

- Du **réseau d'alimentation** : tension d'alimentation, système monophasé ou triphasé.
- De la **puissance utile** du moteur à commander.

76. Démarrage rotorique

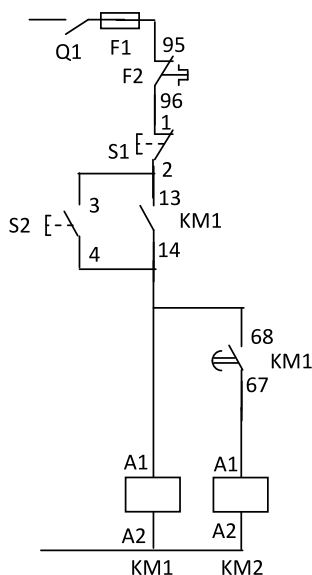
Le démarrage rotorique a l'avantage, si les résistances sont bien choisies, de démarrer avec le couple maximal du moteur pour un courant de démarrage relativement faible.

Principe

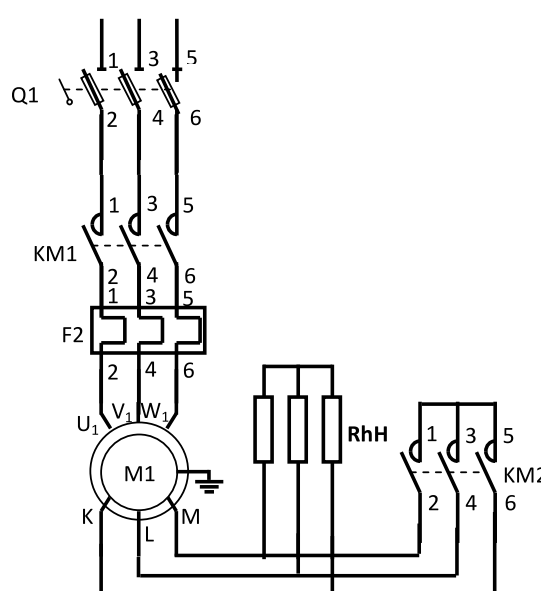
Le démarrage rotorique consiste à insérer, dans un premier temps, des résistances en série avec l'enroulement rotorique afin de limiter les courants rotoriques et ainsi réduire l'appel d'intensité. Dans un deuxième temps on court-circuite les enroulements rotoriques. Le démarrage est terminé.

Schéma d'un démarreur rotorique

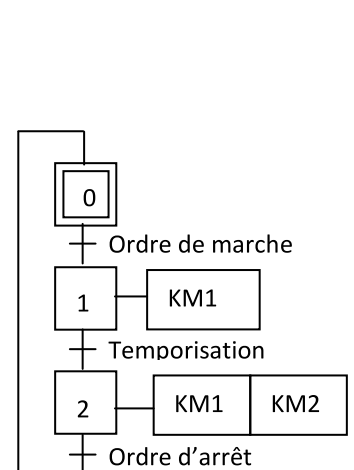
Circuit de commande



Circuit de puissance



Fonctionnement



8 Alimentation du moteur à fréquence variable

81. Etude du couple dans le cas ou $V_{\text{moteur}} = \text{Cte}$

La f.é.m. aux bornes d'un enroulement est de la forme : $V = E = 2,22. Bm.N. S. f$

- Avec :
- ✓ f : fréquence d'alimentation du moteur (Hz)
 - ✓ Bm : induction dans le moteur (T)
 - ✓ V : tension aux bornes du moteur (V)
 - ✓ S : section du fer (m^2)
 - ✓ N : nombre de conducteurs

- Si f varie, V étant constant, Bm va varier pour garder l'égalité dans la relation.
- Si f diminue, Bm va augmenter et va saturer le circuit magnétique, provoquant un échauffement du moteur et surtout une baisse du couple moteur.

Conclusion

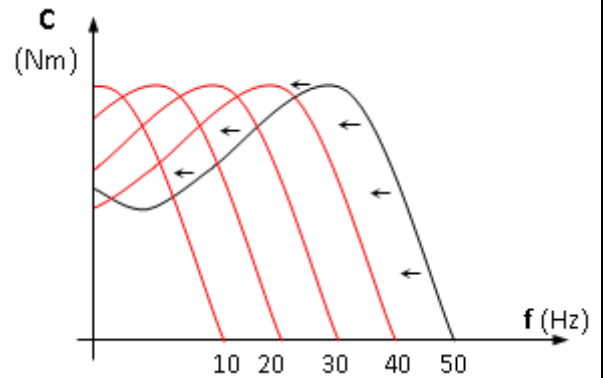
Si l'on souhaite garder Bm constant, tout en faisant varier la fréquence, on doit faire varier V pour maintenir constant le rapport V/f .

82. Etude du couple à $V/f = \text{cte}$

Dans ces conditions, les caractéristiques du couple moteur pour différentes fréquences d'alimentation opèrent une **translation** sur la gauche.

Le variateur délivre au moteur une tension et une fréquence proportionnelles jusqu'à la valeur de 50 Hz.

Pour des fréquences supérieures à 50 Hertz, la tension du moteur ne pouvant plus augmenter, (tension nominale) le rapport U/f diminue, le flux décroît, entraînant une diminution du couple maximum.



9 Variateurs industriels pour moteur asynchrone

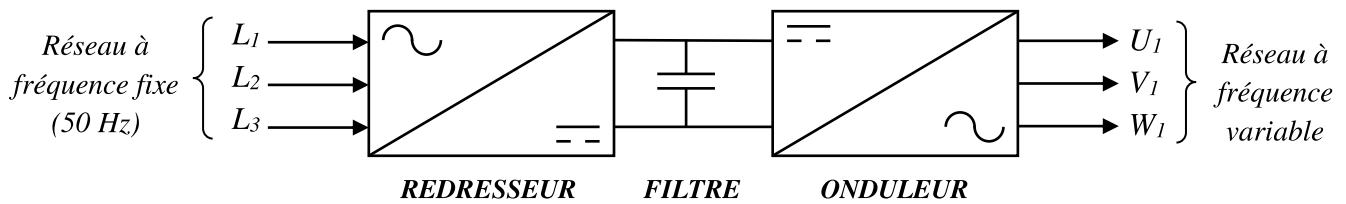


91. Fonctions d'un variateur

Les variateurs de vitesses sont des systèmes qui convertissent les caractéristiques d'une alimentation en fonction d'une consigne donnée. Ils ont plusieurs fonctions parmi lesquelles :

- ✓ **Démarrage** (avec contrôle de l'accélération)
- ✓ **Inversion du sens de rotation**
- ✓ **Freinage** (avec contrôle de la décélération)
- ✓ **Choix de plusieurs vitesses de rotation**
- ✓ **Variation de vitesse** avec consigne analogique
- ✓ **Surveillance du moteur** (courant moteur, échauffement...)
- ✓ **Contrôle du couple** moteur (contrôle vectoriel de flux)

92. Structure interne



Les variateurs de vitesse industriels comportent principalement comme on vient de le voir sur le schéma précédent :

- Un **redresseur** (monophasé ou triphasé) permettant d'élaborer une source de tension continue.
- Un **circuit de filtrage** (condensateur) permettant l'obtention d'une tension pratiquement continue.
- Un **onduleur triphasé autonome** qui recrée à partir de la tension continue fixe un réseau de tension alternative triphasé de fréquence et de tension variables.

93. Choix du variateur

Le choix d'un variateur se fait essentiellement en fonction :

- Du **réseau d'alimentation** : tension d'alimentation, système monophasé ou triphasé.
- De la **puissance utile** du moteur à commander.

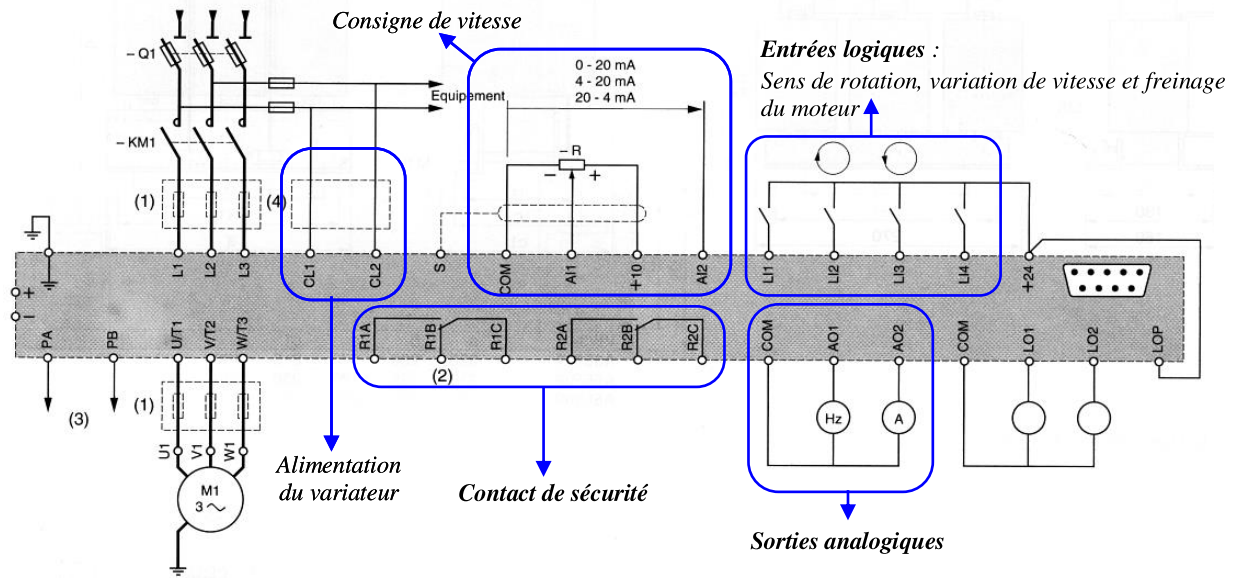
94. Branchement d'un variateur de vitesse Altivar

Les caractéristiques qui vous seront données concerneront le variateur de vitesse ALTIVAR 66 de SCHNEIDER (ancien télémécanique).

Caractéristiques des Altivar 66

Référence	ATV 66 M2	ATV 66 N4
Alimentation du redresseur	Monophasé	Triphasé
Réseau d'alimentation	220-240 V 50: 60 Hz	380-415 V 50: 60 Hz
Pont de puissance		
Forme de la tension et du courant		
Gamme de fréquence	1 à 67 Hz	1 à 110 Hz
Sens de marche	2	2
Quadrant de fonctionnement		
Freinage d'arrêt	////	Par injection de courant continu
Freinage de ralentissement	Rhéostatique avec module option	Rhéostatique avec module option
Tension moteur	220-240 V	380-415 V
Gamme de puissance	0.75 à 37 kW	0.75 à 250 kW

Branchement d'un variateur de vitesse Altivar 66



Exemple de document de choix d'un variateur Altivar série 18

Réseau		Moteur		Altivar 18		Puissance dissipée à la charge nominale	Référence	Masse	
Tension d'alimentation	Courant de ligne (1)		Puissance indiquée sur plaque	Courant de sortie permanent	Courant transitoire maxi (2)				
U1...U2	à U1	à U2	kW	HP	A	A	W	kg	
V	A	A							
200...240 50/60 Hz monophasé	4,4	3,9	0,37	0,5	2,1	3,1	23	ATV-18U09M2	1,5
	7,6	6,8	0,75	1	3,6	5,4	39	ATV-18U18M2	1,5
	13,9	12,4	1,5	2	6,8	10,2	60	ATV-18U29M2	2,1
	19,4	17,4	2,2	3	9,6	14,4	78	ATV-18U41M2	2,8
200...230 50/60 Hz triphasé	16,2	14,9	3		12,3	18,5	104	ATV-18U54M2	3,3
	20,4	18,8	4	5	16,4	24,6	141	ATV-18U72M2	3,3
	28,7	26,5	5,5	7,5	22	33	200	ATV-18U90M2	7,8
	38,4	35,3	7,5	10	28	42	264	ATV-18D12M2	7,8
380...460 50/60 Hz triphasé	2,9	2,7	0,75	1	2,1	3,2	24	ATV-18U18N4	2
	5,1	4,8	1,5	2	3,7	5,6	34	ATV-18U29N4	2,1
	6,8	6,3	2,2	3	5,3	8	49	ATV-18U41N4	2,8
	9,8	8,4	3		7,1	10,7	69	ATV-18U54N4	3,3
	12,5	10,9	4	5	9,2	13,8	94	ATV-18U72N4	3,3
	16,9	15,3	5,5	7,5	11,8	17,7	135	ATV-18U90N4	8
	21,5	19,4	7,5	10	16	24	175	ATV-18D12N4	8
	31,8	28,7	11	15	22	33	261	ATV-18D16N4	12
42,9	38,6	15	20	29,3	44	342	ATV-18D23N4	12	

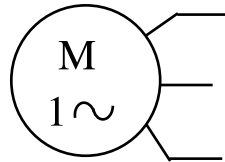
(1) Valeur typique sans inductance additionnelle
(2) Pendant 60 secondes

Protections

- Protection du variateur en cas de :
 - Surtensions et Sous-tensions du réseau d'alimentation :
 - Les court-circuits (Ph/Ph ; Ph/T)
 - Les échauffements excessifs
- Protection du moteur en cas de :
 - Surcharge
 - Coupure de phase
 - Les échauffements excessifs

10 Moteur asynchrone monophasé

Tout comme le moteur asynchrone triphasé, le moteur asynchrone monophasé possède deux parties distinctes : le stator (partie fixe) et le rotor (partie mobile).



101. Principe de fonctionnement

On démontre (théorème de Leblanc) que le champ magnétique produit par une bobine alimentée en courant alternatif monophasé se décompose en deux champs tournants de sens inverse, qui produisent un couple résultant, mais au démarrage ce couple résultant est nul.

102. Conséquence

Le moteur asynchrone nécessite un système de démarrage auxiliaire.

103. Démarrage.

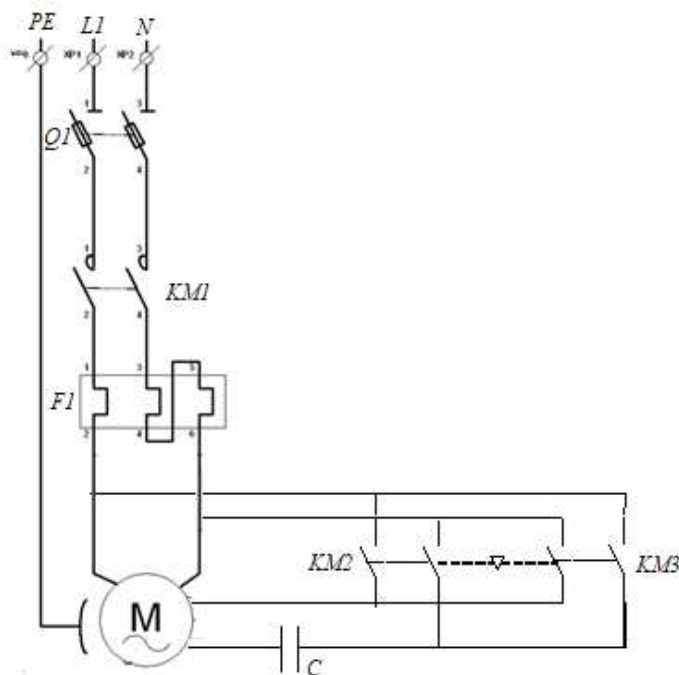
Il faut créer un couple au démarrage, pour cela on réalise le démarrage à l'aide d'un enroulement auxiliaire alimenté par l'intermédiaire d'un condensateur.

L'alimentation de cet enroulement est donc déphasée de 90° par rapport à l'enroulement principal et permet de créer un couple de démarrage.

Lorsque le moteur a atteint sa vitesse nominale l'enroulement auxiliaire n'est plus utile, il peut toutefois rester sous tension (moteur à condensateur permanent) ou être éliminé par contact centrifuge.

104. Moteur réversible à condensateur permanent

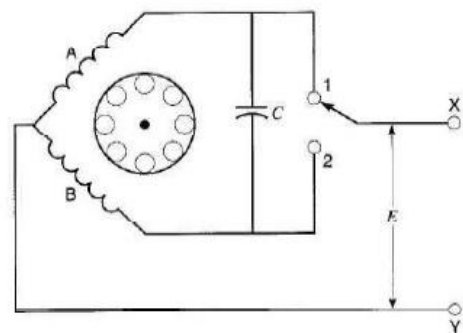
Pour inverser le sens de rotation du moteur, il faut inverser le branchement de l'enroulement auxiliaire par rapport à l'enroulement principal



Sens 1	KM1 et KM2 sont fermés
Sens 2	KM1 et KM3 sont fermés

On peut aussi inverser le sens de rotation par un simple commutateur à 2 pôles.

Lorsque le commutateur est en **position 1**, la tension de la ligne apparaît aux bornes de l'enroulement A et le condensateur est en série avec l'enroulement B. Dès que le commutateur bascule en **position 2**, le moteur ralentit, arrête, puis retourne à pleine vitesse dans le sens opposé.

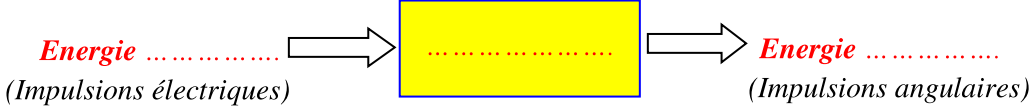


Sens 1	Position 1
Sens 2	Position 2

1 Description et Principe du moteur pas à pas

11. Principe

Le moteur pas à pas constitue un convertisseur électromécanique destiné à convertir directement un signal électrique numérique en un positionnement angulaire de caractère incrémental.



On constate que le système est beaucoup plus simple. A chaque impulsion du signal de commande correspond au niveau du rotor un déplacement angulaire θ défini appelé « pas ».

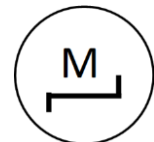
Un moteur pas à pas est caractérisé par son nombre de pas par tour N_p (résolution). Il peut avoir une valeur comprise entre 4 et 400.

La vitesse de rotation est fonction de la fréquence des impulsions.

On rencontre 3 types de moteur pas à pas qui se différencient par :

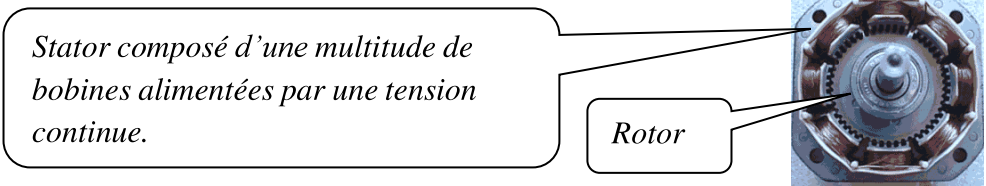
- Le stator : unipolaire ou bipolaire ;
- Le rotor : à aimant permanent, à réluctance variable ou hybride.

Symbole



12. Constitution

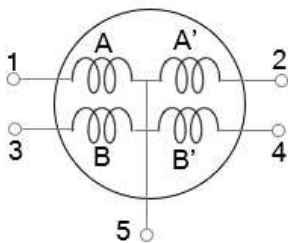
Les moteurs pas à pas sont constitués d'un rotor et d'un stator.



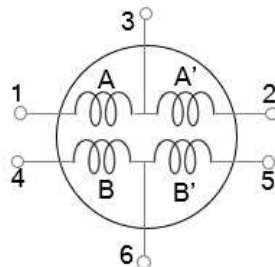
On rencontre les moteurs pas à pas unipolaire et bipolaire qui se différencient par la structure de leur stator et leur commande.

STATOR unipolaire

A 5 fils

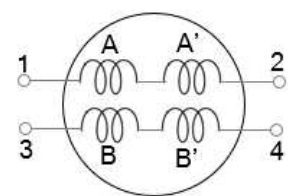


A 6 fils



STATOR bipolaire

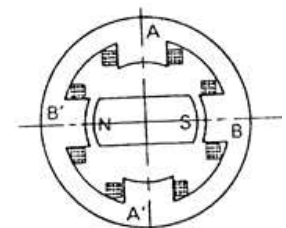
4 fils



2 Moteur à aimants permanents

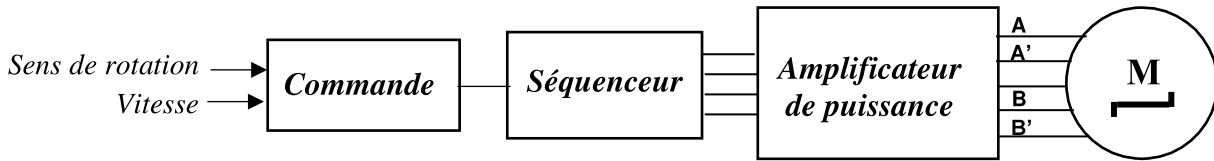
Ce moteur est basé sur la règle du flux maximal. Il est constitué par :

- **Stator** (partie fixe) : formé d'un circuit magnétique et des bobines (phases) dont le rôle est de créer un flux magnétique à directions multiples.
- **Rotor** (partie mobile) : est un aimant permanent, formé par une succession de pôles Nord et Sud. Il se positionne suivant le flux maximum du stator.



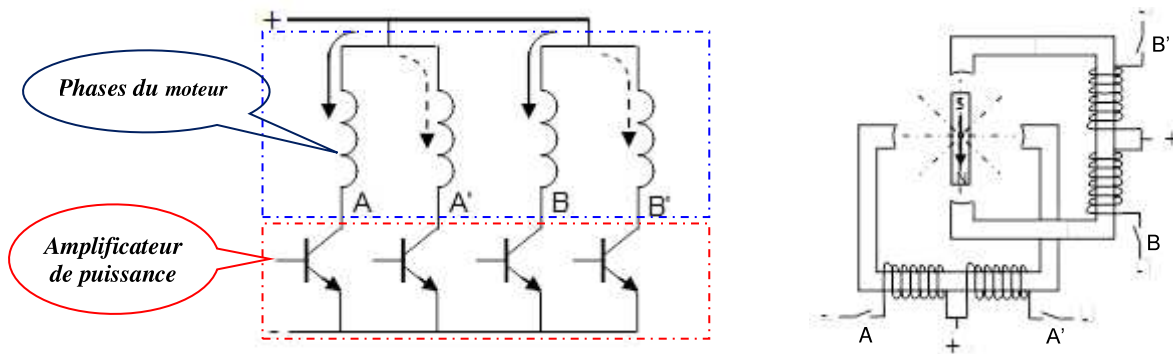
21. Alimentation des phases du moteur pas à pas

Le principe de fonctionnement des moteurs pas à pas repose sur la commutation successive des enroulements stator (ou phase). Pour cela, une impulsion électrique est traduite par un **séquenceur** agissant sur une électronique de commutation (**drivers ou transistors de puissance**) qui distribue les polarités dans les enroulements. Une seule commutation provoque un seul **pas** quelle que soit la durée de l'impulsion (supérieure à une valeur minimale).



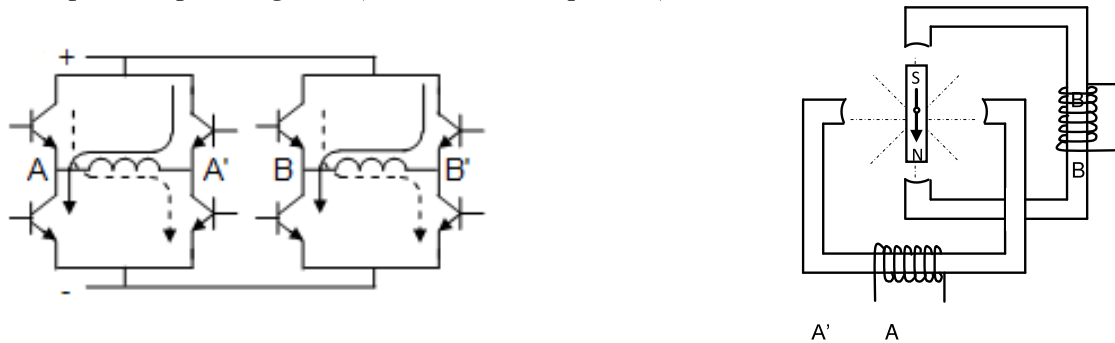
Alimentation unipolaire (Commutation unidirectionnelle)

Les enroulements sont à point milieu. Les bornes sont toujours alimentées par une polarité de même signe (d'où le terme unipolaire).



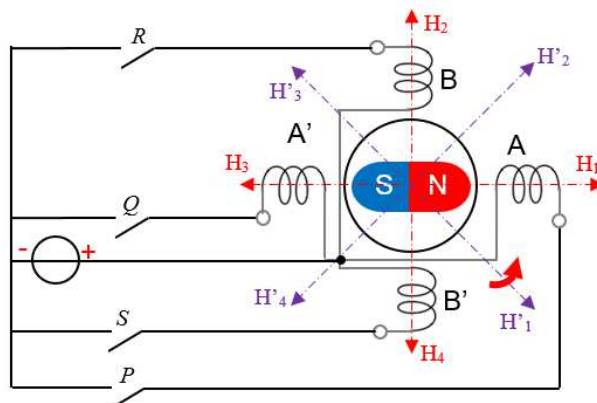
Alimentation bipolaire (Commutation bidirectionnelle)

Les enroulements du stator n'ont pas de point milieu. Chaque borne de chaque enroulement est alimentée par une polarité positive puis négative (d'où le terme bipolaire).



22. Modes de commande (ordre d'alimentation des phases)

Dans notre cas, il s'agit d'un moteur pas à pas unipolaire. L'excitation individuelle des phases est assurée par l'un des interrupteurs P, R, Q, S. Deux modes de commande sont possibles : pas entier et demi-pas.



Commande en pas entier (commande symétrique)

Mode 1 : L'excitation individuelle des bobines crée les champs suivants :

$P \rightarrow H_1, R \rightarrow H_2, Q \rightarrow H_3$ et $S \rightarrow H_4$. Ce qui donne le cycle de commutation

P	1	....	....	....
R	0	....	....	....
Q	0.	....	....	....
S	0.	....	....	....
Positions du rotor	<p>Pas 1</p>	<p>Pas 2</p>	<p>Pas 3</p>	<p>Pas 4</p>

Mode 2 (couple maximal) : L'excitation des 2 bobines en même temps crée les champs suivants :

$P R \rightarrow H'_2, R Q \rightarrow H'_3, Q S \rightarrow H'_4$ et $S P \rightarrow H'_1$. Ce qui donne le cycle de commutation

P	1	....	....	....
R	1	....	....	....
Q	0.	....	....	....
S	0.	....	....	....
Positions du rotor	<p>Pas 1</p>	<p>Pas 2</p>	<p>Pas 3</p>	<p>Pas 4</p>

Commande en demi-pas (commande asymétrique)

La combinaison des deux modes précédents permet de doubler le nombre de pas, le rotor s'alignant successivement face à un pôle et entre 2 pôles. Ce qui donne le cycle de commutation

P	1	....	....	....	....	....	....	....
R	0	....	....	....	....	....	....	....
Q	0	....	....	....	....	....	....	....
S	0	....	....	....	....	....	....	....
Positions du rotor	<p>Pas 1</p>	<p>Pas 2</p>	<p>Pas 3</p>	<p>Pas 4</p>	<p>Pas 5</p>	<p>Pas 6</p>	<p>Pas 7</p>	<p>Pas 8</p>

23. Caractéristiques du moteur pas à pas

Angle de pas

$$\theta^\circ = \frac{360^\circ}{N_p}$$

Détermination du N^{bre} de pas/tour

$$N_p = m \cdot p \cdot K_1 \cdot K_2$$

- m : nombre de phases au stator.
- p : nombre de paires de pôles au rotor.
- Type d'alimentation K_1

Unipolaire $K_1 = 1$
- Type de commande K_2

Pas entier $K_2 = 1$
Demi-pas $K_2 = 2$

Fréquence

$$f = (\text{nombre de pas}) / \text{seconde}$$

Vitesse de rotation en tr/s

$$n = \frac{f}{N_p}$$

3 Moteurs pas à pas à réluctance variable

Le moteur à réluctance variable diffère d'un moteur à aimant permanent par son rotor.

Le rotor d'un moteur à réluctance variable est en matériau magnétique non aimanté (fer doux). Il comporte à sa périphérie des dents, en nombre différent du nombre de dents du stator.

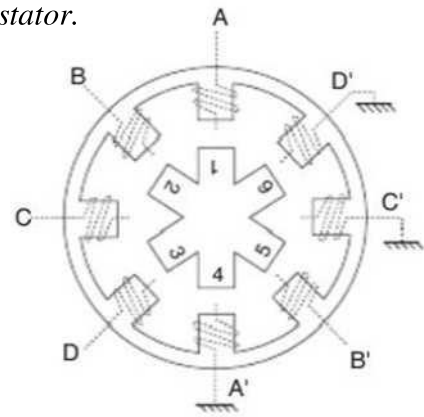
Détermination du N^{bre} de pas/tour

Le nombre de pas/tour est :

$$N_p = \frac{Z_S \cdot Z_R}{|Z_S - Z_R|}$$

Avec : Z_S : le nombre de dents du stator

Z_R : le nombre de dents du rotor

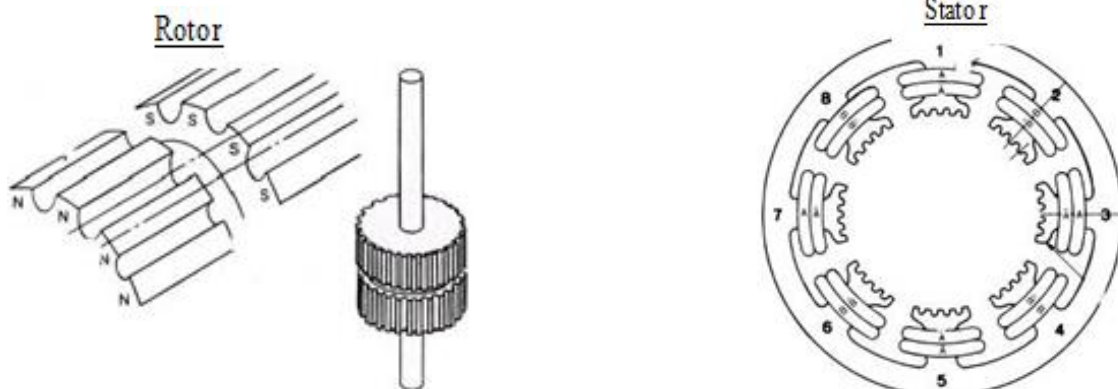


4 Moteurs pas à pas hybrides

La plupart des moteurs pas à pas sont en fait des moteurs hybrides. Ces moteurs utilisent les deux principes précédents :

- Effet de réluctance variable, dû aux dents du rotor ;
- Utilisation d'aimants permanents dans le rotor.

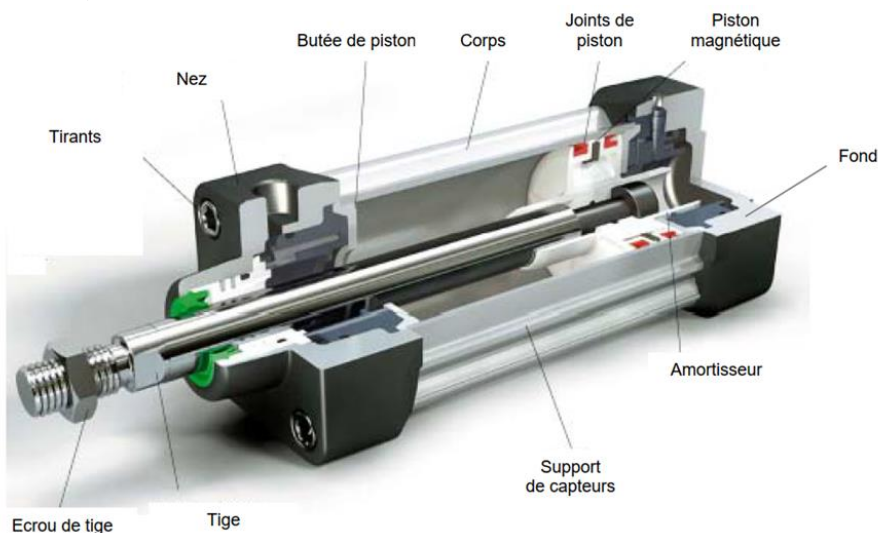
Caractéristiques : couple élevé et bonne résolution (faible pas).



1 Vérins

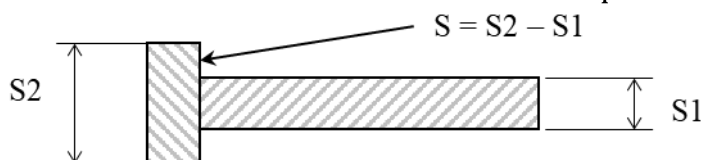
11. Description et principe de fonctionnement

Un vérin hydraulique est constitué d'un cylindre dans lequel un fluide (.....), qui est fourni par un accumulateur hydraulique ou une pompe hydraulique, peut mettre en mouvement un piston solidaire d'une tige. Le piston sépare le cylindre en deux chambres.



La pression (p) d'utilisation d'un vérin est liée à :

- La force **F** à développer (en tirant).
- La section **S** annulaire : $S = \pi \cdot r^2 = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$



Formule classique Formule pratique

$$p_{(Pa)} = \frac{F_{(N)}}{S_{(m^2)}} \text{ ou } p_{(bar)} = \frac{F_{(daN)}}{S_{(cm^2)}}$$

La vitesse (v) de déplacement de la tige est liée à :

- **S** : surface du piston (en m²)
- **Q** : débit reçu par le vérin (en m³/s)

Formule classique Formule pratique

$$v_{(m/s)} = \frac{Q_{(m^3/s)}}{S_{(m^2)}} \text{ ou } v_{(cm/s)} = \frac{Q_{(l/min)}}{0,06 \cdot S_{(cm^2)}}$$

Application :

Le piston d'un vérin a une surface de **40 cm²**. Ce vérin reçoit un débit de **24 L/min**. Quelle est :

- La vitesse **v** de déplacement en sortie de tige : **v** =
- La durée **t** de la course si celle-ci fait **20 cm** : **t** =

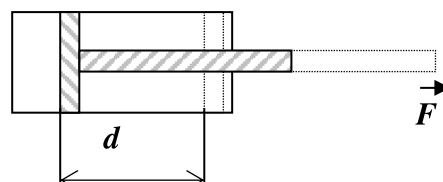
12. Puissances et rendement d'un vérin

Puissance utile (mécanique)

Si **d** désigne la distance de déplacement (**course**) de la tige parcourue pendant un temps **t**, alors le travail **W** effectué par la force au cours du déplacement est donné par : **W** =

La puissance utile **Pu** du vérin est obtenue en faisant :

$$Pu_{(w)} = \frac{W_{(J)}}{t_{(s)}} = \frac{F_{(N)} \cdot d_{(m)}}{t_{(s)}} = F_{(N)} \cdot v_{\left(\frac{m}{s}\right)}$$



Puissance absorbée (hydraulique)

Un fluide hydraulique de débit Q et de pression p transporte une puissance hydraulique :

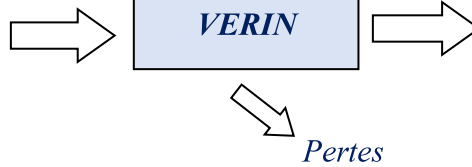
$$Pa_{(W)} = p_{(Pa)} \cdot Q \left(\frac{m^3}{s} \right)$$

Rendement

Les différentes pertes sont dues aux frottements ou aux fuites :

$$\eta = \frac{Pu}{Pa} = \frac{F \cdot v}{p \cdot Q}$$

Puissance hydraulique
 $Pa = p \cdot Q$



Puissance mécanique
 $Pu = F \cdot v$

13. Principaux types de vérins

	Symboles	Schémas
<p>Vérin simple effet</p> <p>L'ensemble tige piston se déplace dans un seul sens sous l'action du fluide sous pression. Le retour est effectué par un ressort ou charge.</p> <p>Avantages : économique et consommation de fluide réduite.</p> <p>Inconvénients : encombrant, course limitée.</p> <p>Utilisation : travaux simples (serrage, éjection, levage...)</p>		
<p>Vérin double effet</p> <p>L'ensemble tige piston peut se déplacer dans les deux sens sous l'action du fluide. L'effort en poussant est légèrement plus grand que l'effort en tirant.</p> <p>Avantages : plus souple, réglage plus facile de la vitesse, amortissement de fin de course réglable.</p> <p>Inconvénients : plus coûteux.</p> <p>Utilisation : grand nombre d'applications industriels</p>		
<p>Vérin à tige télescopique</p> <p>Simple effet permet des courses importantes tout en conservant une longueur repliée raisonnable.</p>		
<p>Vérin rotatif</p> <p>L'énergie du fluide est transformée en mouvement de rotation. L'angle de rotation peut varier de 90° à 360°. Les amortissements sont possibles.</p>		

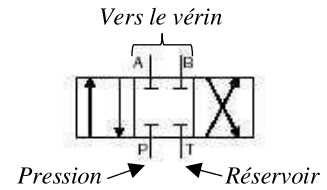
2 Distributeurs hydrauliques

Les distributeurs (à tiroir les plus courants) ont pour rôle de diriger (aiguiller), le débit d'huile dans le circuit. Selon sa commande, on distingue :

- Les distributeurs tout ou rien
- Les distributeurs proportionnels

21. Distributeurs tout ou rien

Exemple de distributeur 4/3 à commande électrique, centre fermé, centrage par ressorts (le plus courant en hydraulique).



Au Repos Aucune bobine n'est alimentée	Bobine L ₁ est alimentée Tiroir vers la droite	Bobine L ₂ est alimentée Tiroir vers la gauche
<ul style="list-style-type: none"> • Le tiroir est au centre grâce aux deux ressorts. • P, A et B sont fermés. • T retour au réservoir. 	<ul style="list-style-type: none"> • Le tiroir se déplace vers la droite. • P communique avec B. • A communique avec T. 	<ul style="list-style-type: none"> • Le tiroir se déplace vers la gauche. • P communique avec A. • B communique avec T.

Symbole des principaux distributeurs hydrauliques

Symbole	Désignation	Commentaire
	Distributeur 4/3 centre fermé .	Tous les orifices sont fermés.
	Distributeur 4/3 centre tandem .	La pompe débite au réservoir par le distributeur.
	Distributeur 4/3 P fermé Y à droite (ou A et B en by-pass vers T).	Alimentation de moteurs hydrauliques.
	Distributeur 4/3 T fermé Y à gauche (ou A et B en by-pass vers P).	Si vérin simple tige, il sort et est maintenu sorti.
	Distributeur 4/3 à centre ouvert .	Tous les orifices communiquent.

22. Distributeurs proportionnels

Pour régler la vitesse de déplacement de la tige d'un vérin, il suffit d'ajuster le débit de fluide qui alimente le vérin en utilisant un distributeur proportionnel.

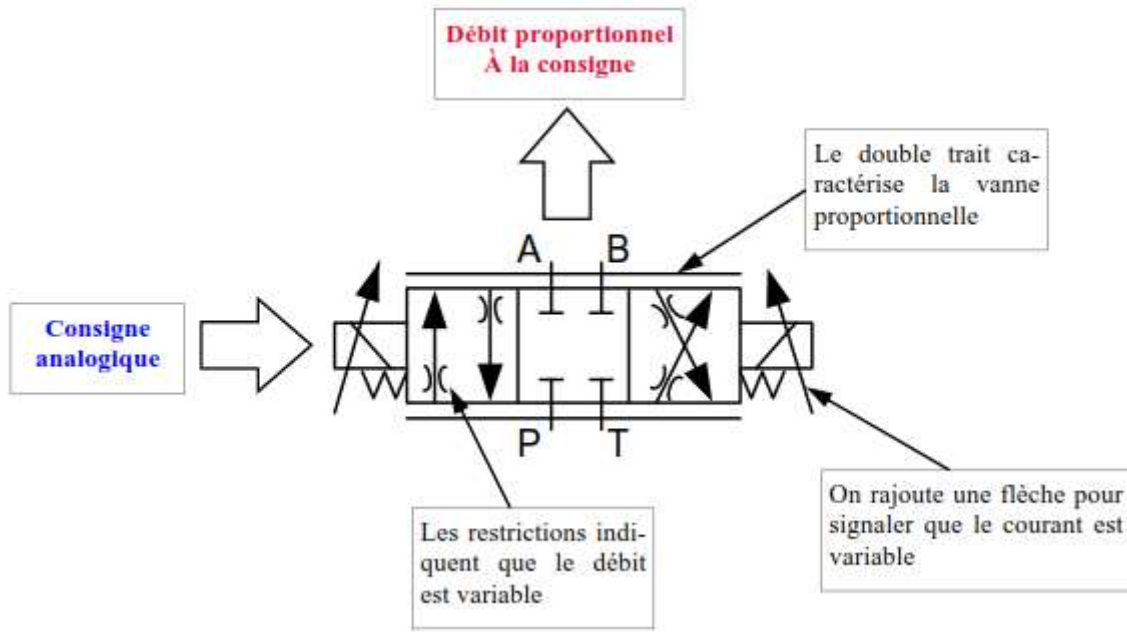
Principe

Pour les distributeurs proportionnels les bobines sont alimentées par un courant électrique variable.

Ce courant actionne plus ou moins le tiroir du distributeur. Le débit de sortie est donc variable.

Les distributeurs proportionnels permettent donc de **contrôler la direction du fluide et son**

Distributeur proportionnel 4/3
bistable à pilotage électrique



Régulation et asservissement de la vitesse de la tige d'un vérin

La vitesse de sortie de la tige est réglée. Si le débit de la pompe varie, ou si la charge ralentit le vérin, le dispositif de mesure renvoie la nouvelle valeur à la carte de régulation. Cette carte compense alors le signal par rapport à la consigne, et maintient donc la vitesse initiale.

