

HEFF

**Cours d'électricité
et de
mécanique appliquées**

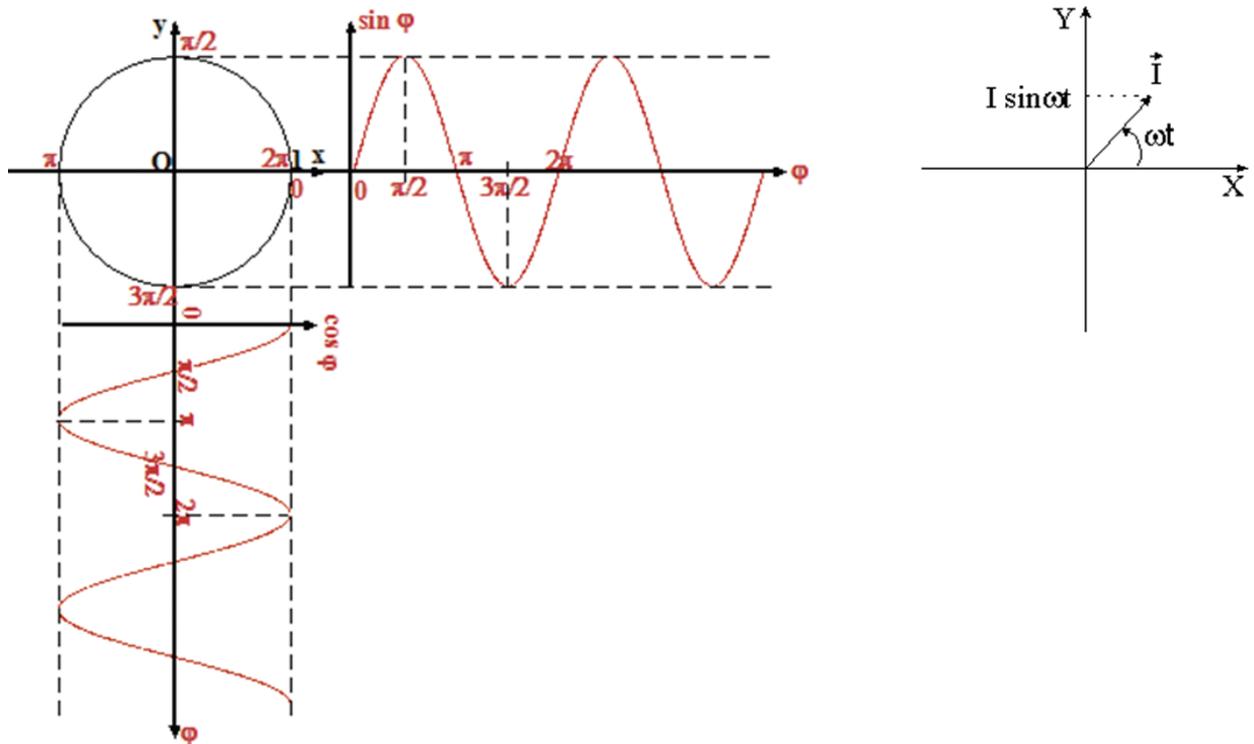
Partie électricité

G. Barmarin

2013-2014

Table des matières

La notion de tension alternative sinusoïdale



Cette projection sur l'axe vertical peut être représentée par un vecteur tournant à vitesse angulaire ω autour de l'origine dans le plan xOy . Un tel vecteur tournant s'appelle **vecteur de Fresnel ou phaseur**.

Le vecteur tournant peut être représenté par un nombre complexe :

$$\vec{I} = \text{Re} \vec{I} + j \text{Im} \vec{I} = I(\cos \omega t + j \sin \omega t) = I e^{j\omega t}$$

avec $j^2 = -1$.

La grandeur sinusoïdale est la partie imaginaire du nombre complexe associé au vecteur tournant:
 $i(t) = \text{Im} (I e^{j\omega t})$.

La **norme** du phaseur est donc égale à l'**amplitude de la grandeur sinusoïdale**, et l'**angle** entre le phaseur et l'axe Ox représente la **phase**, ce qui justifie le nom de PHASEUR.

Valeurs d'une tension périodique

Valeur de crête ou valeur maximale

$$V_{\max} = \sqrt{2} \cdot V_{\text{eff}}$$

C'est la valeur maximale qu'atteint le signal. Par exemple pour le réseau de distribution électrique sous 230V_{eff}, la valeur de crête ou maximale est de 325 V.

Valeur efficace ou rms (Root Mean Square)

C'est la valeur quadratique moyenne.

$$\text{En sinusoïdal } V_{\text{eff}} = V_{\max} / \sqrt{2}$$

En Europe, le réseau de distribution est basé sur une valeur efficace de 230V

$$\sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_t^{t+T} u^2(t) dt}$$

Valeur moyenne

En sinusoïdal, sur une période complète, la valeur moyenne est nulle.

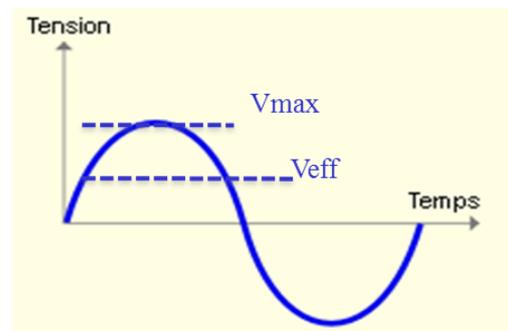
$$V_{\text{moyen}} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T [v(t)] \cdot dt$$

Facteur de crête

Le facteur de crête est le rapport entre la valeur de crête (max) et la valeur rms. Il fournit une mesure de la « déformation » du signal.

Dans le cas d'une alimentation sinusoïdale:

$$FC = \frac{V_{\text{Max}}}{V_{\text{efficace}}} = \sqrt{2} = 1,414$$



Le dipôle **résistance**

Un conducteur ohmique est un **composant électrique** appelé également résistance et qui vérifie la **loi d'Ohm** :

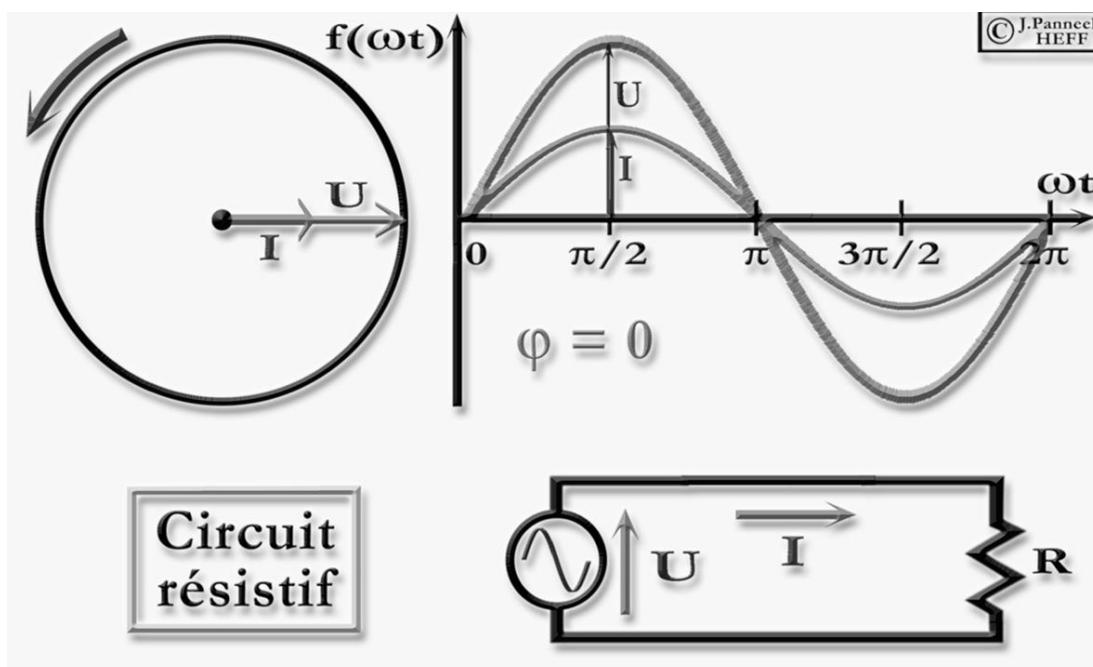
$$U = R \cdot I$$

Avec

I l'**intensité du courant**, en **ampères (A)**, traversant la résistance

et

U la **tension**, en **volts (V)**, entre ses bornes.



Le dipôle « Inductance », ou bobine ou Self

Symbolisation d'une bobine parfaite d'inductance L , de la tension à ses bornes u et de l'intensité du courant qui la traverse i en convention récepteur.

Son symbole dans les schémas est L .

Une bobine d'inductance L (*exprimée en Henry H*) est un dipôle tel que la tension à ses bornes soit proportionnelle à la dérivée de l'intensité du courant qui le traverse en convention récepteur :

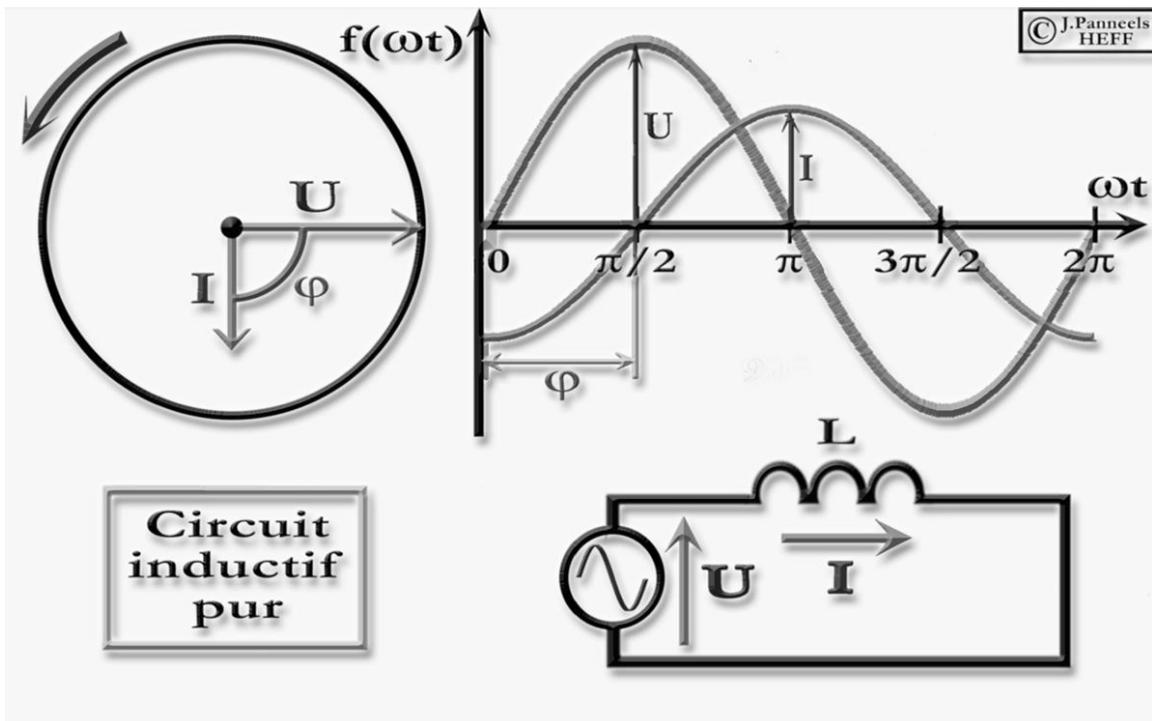
$$u = L \frac{di}{dt}$$

Cette relation vient de l'expression du **flux magnétique** en **magnétostatique** :

$$u = \frac{d\Phi}{dt} \quad (\text{loi de Faraday})$$

et de $\Phi = L \cdot i$ conséquence de la définition de L .

Cette équation montre que l'intensité du courant traversant une inductance ne peut pas subir de discontinuité, cela correspondrait en effet à dérivée infinie donc à une tension infinie à ses bornes, donc à une puissance infinie.



Si la tension u est sinusoïdale, et que j'ai :

$$u = L \frac{di}{dt}$$

Pour obtenir i , j'intègre des deux côtés de l'égalité et i correspond à **l'intégrale d'un sin**, donc suit une loi en **-cos** par conséquent :

le courant dans une inductance est déphasé de 90° et en retard sur la tension (voir figure ci-dessus)

Puissance instantanée dans un dipôle inductif

En convention récepteur la puissance instantanée fournie à l'inductance est égale à :

$$P = u \cdot i = L \frac{di}{dt} \cdot i$$

En utilisant la transformation mathématique suivante :

$$\frac{d(i^2)}{dt} = i \cdot \frac{d(i)}{dt} + \frac{d(i)}{dt} \cdot i = 2 \frac{d(i)}{dt} \cdot i$$

on obtient la relation :

$$P = \frac{1}{2} \cdot L \frac{d(i^2)}{dt}$$

La puissance instantanée fournie à une inductance est liée à la variation du carré de l'intensité qui la traverse : si celui-ci augmente, l'inductance emmagasine de l'énergie. Elle en restitue dans le cas contraire.

L'énergie échangée entre 2 instants t_i et t_f vaut :

$$W = \frac{1}{2} \cdot L (i_{t_f}^2 - i_{t_i}^2)$$

Remarque

Il résulte de ce qui précède qu'il est **difficile de faire varier rapidement le courant qui circule dans une bobine** et ceci d'autant plus que la valeur de son **inductance** sera grande.

Cette propriété est souvent utilisée pour supprimer de petites variations de courant non désirées.

L'effet de l'**inductance** face aux variations du courant est analogue en mécanique à l'effet de la **masse** face aux variations de la vitesse : quand on veut augmenter la vitesse il faut fournir de l'énergie cinétique et ceci d'autant plus que la masse est grande. Quand on veut freiner, il faut récupérer cette énergie.

Débrancher brusquement une bobine parcourue par un courant, c'est un peu comme arrêter une voiture en l'envoyant contre un mur.

Le dipôle « **Condensateur** », ou capacité ou Capacitance

La relation caractéristique d'un condensateur idéal est :

$$i = C \frac{du}{dt}$$

où :

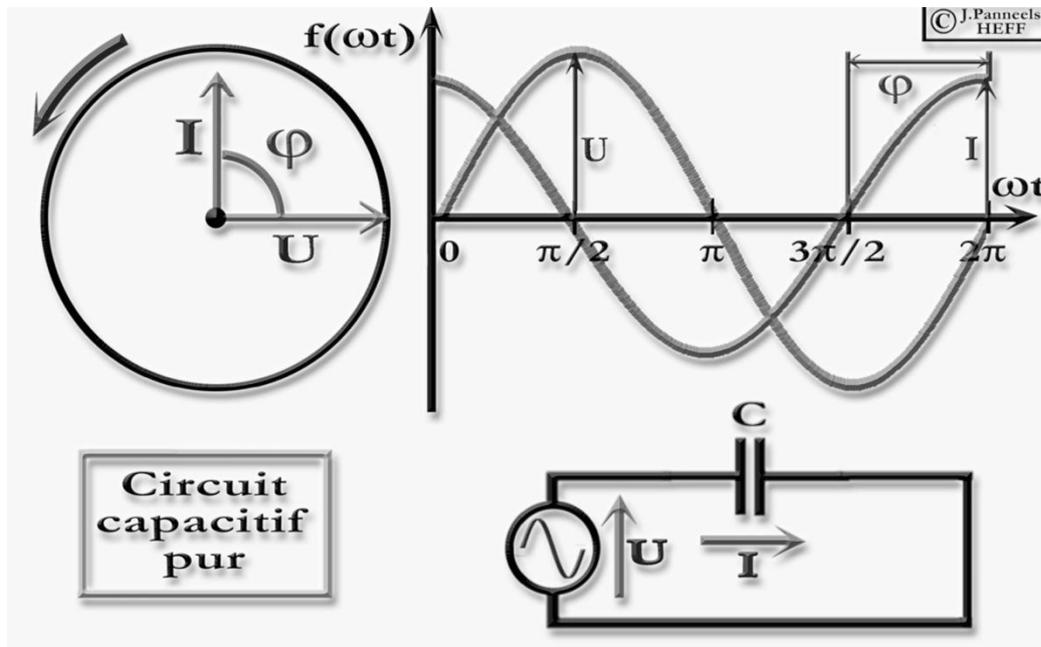
i est l'intensité du courant qui traverse le composant, exprimée en Ampères (symbole : **A**)

u est la tension aux bornes du composant, exprimée en Volts (symbole : **V**)

C est la capacité électrique du condensateur, exprimée en Farads (symbole : **F**)

$\frac{du}{dt}$

est la dérivée de la tension par rapport au temps



Si la tension u est sinusoïdale, et que j'ai :

$$i = C \frac{du}{dt}$$

Pour obtenir i , je dérive u et i correspond à **la dérivée d'un sin**, donc suit une loi en **cos** par conséquent :

le courant dans un condensateur est déphasé de 90° et en avance sur la tension (voir figure ci-dessus)

Explication physique

Quand on applique une tension sur un condensateur la tension ne peut pas s'établir instantanément, à l'instant T la tension à ses bornes est nulle et l'intensité est maximum (le condensateur commence sa charge), au fur et à mesure que le condensateur se charge, la tension augmente et l'intensité décroît, quand le condensateur est chargé, la tension à ses bornes est maximum et l'intensité est considérée comme nulle, lors de la décharge, le même phénomène se produit.

En régime alternatif la tension et l'intensité se retrouvent donc déphasées, quand l'une est nulle

l'autre est maximum et le courant est en avance sur la tension.

Pour la self c'est identique sauf que c'est le courant qui ne peut pas s'établir instantanément. A l'instant T, la tension aux bornes de la self est maximum et l'intensité est nulle. Quand la bobine se charge en énergie, la tension à ses bornes décroît et l'intensité augmente, Une fois la self "chargée" le tension à ses bornes est nulle et l'intensité est maximum.

En régime alternatif la tension et l'intensité se retrouvent donc déphasées comme pour le condensateur mais cette fois le courant est en retard sur la tension.

Dipôles réels

En réalité, les dipôles purs n'existent pas!

Pour une résistance :

$R = R + (L) + (C)$ L correspond à la très faible inductance du film bobiné
C correspond à la capacité entre les spires du film bobiné

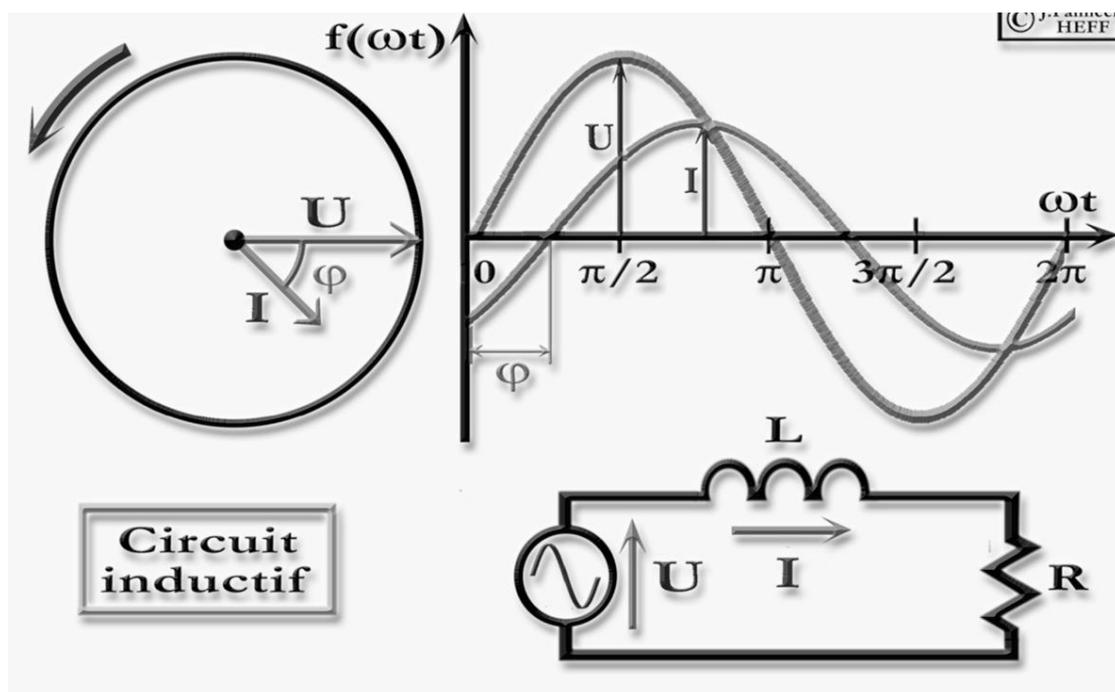
Pour une inductance :

$L = L + (R) + (C)$ R correspond à la très faible résistance du fil bobiné
C correspond à la capacité entre les spires de fil

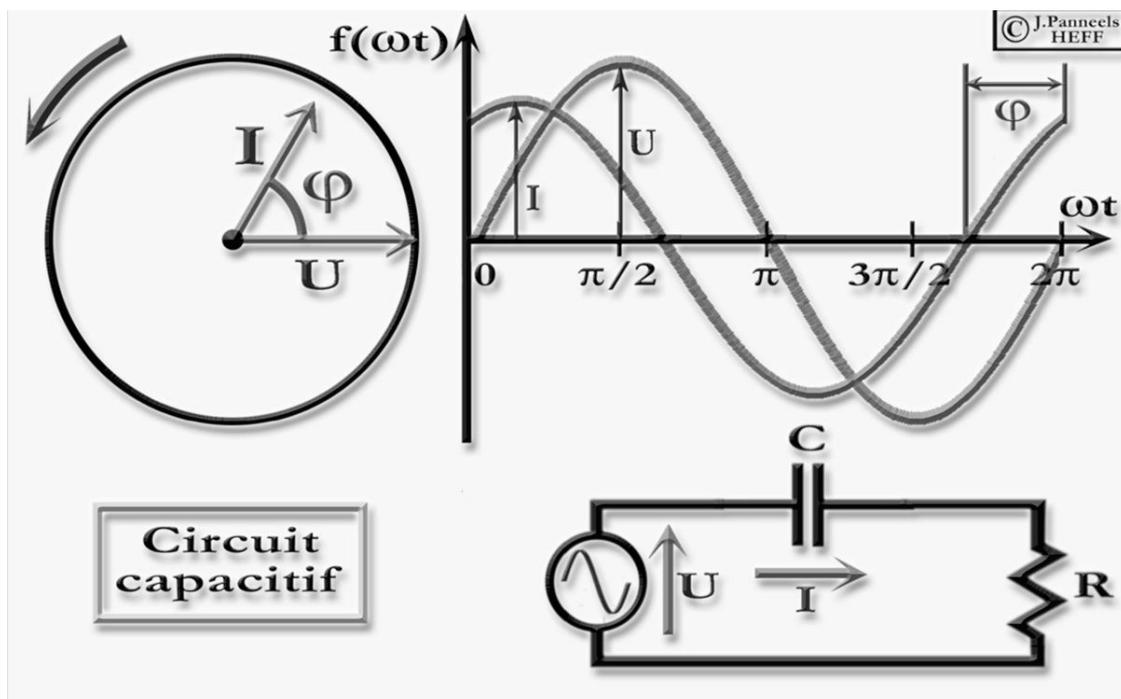
Pour une capacité :

$C = C + (R)$ R correspond à la très grande résistance de l'isolant

Influence d'une résistance en série avec une inductance



Influence d'une résistance en série avec un condensateur



Synthèse

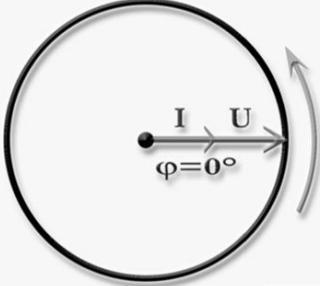
Charge résistive  R

I U $\varphi = 0^\circ$

En transitoire : R

En alternatif : R

En continu : R



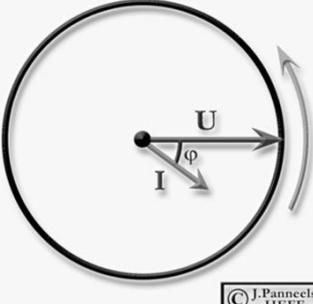
Charge inductive  R L

I U φ φ inductif

En transitoire : $R + L \frac{di(t)}{dt}$

En alternatif : $R + j\omega L$

En continu : n'a pas de sens



© J.Panneels HEFF

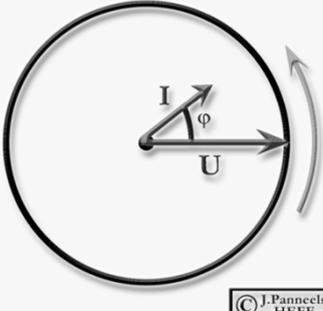
Charge capacitive  R C

I U φ φ capacitif

En transitoire : $R + \frac{1}{C} \int_0^t i(t) dt$

En alternatif : $R + \frac{1}{j\omega C}$

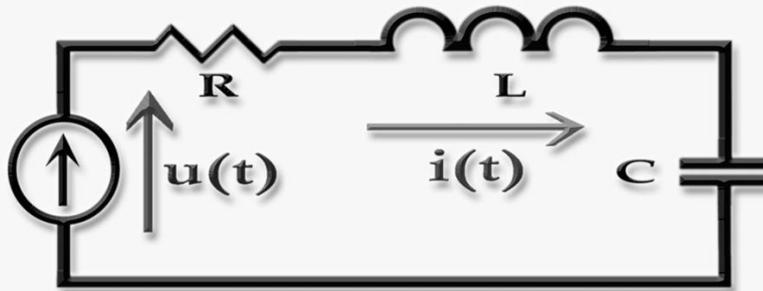
En continu : n'a pas de sens



© J.Panneels HEFF

Circuit général

Pour un circuit général combinant une résistance en série avec une inductance et une capacité nous avons :

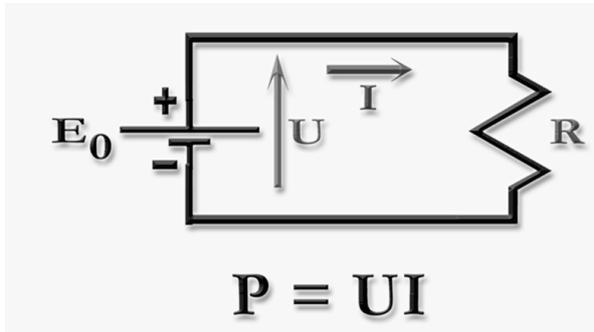


$$u(t) = Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} + \frac{1}{C} \int_0^t i(t) dt$$

Puissance électrique

Puissance en courant continu

Cas d'une résistance :



U en Volt, I en Ampère, P en Watt

La puissance consommée par un conducteur ohmique de résistance R peut encore se calculer de deux manières :

Soit on connaît, la valeur efficace de la tension U effectivement appliquée aux bornes du dipôle (cette dernière peut être différente de la tension délivrée par le générateur) :

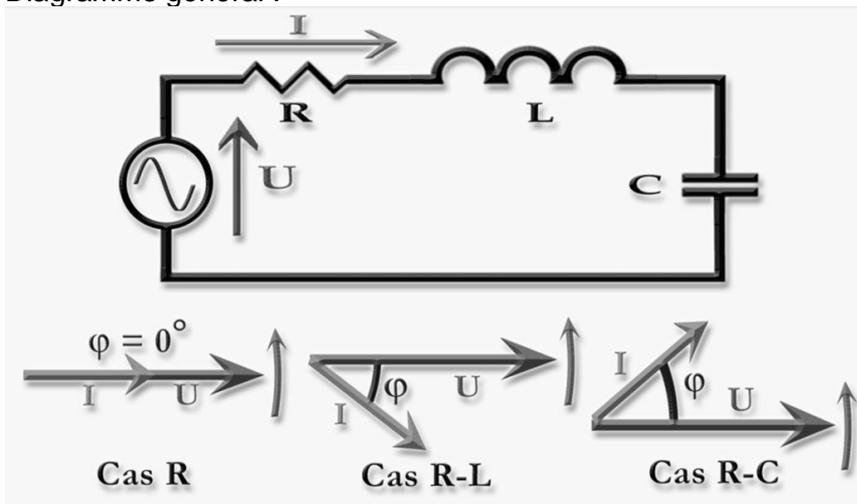
$$P = \frac{U^2}{R}$$

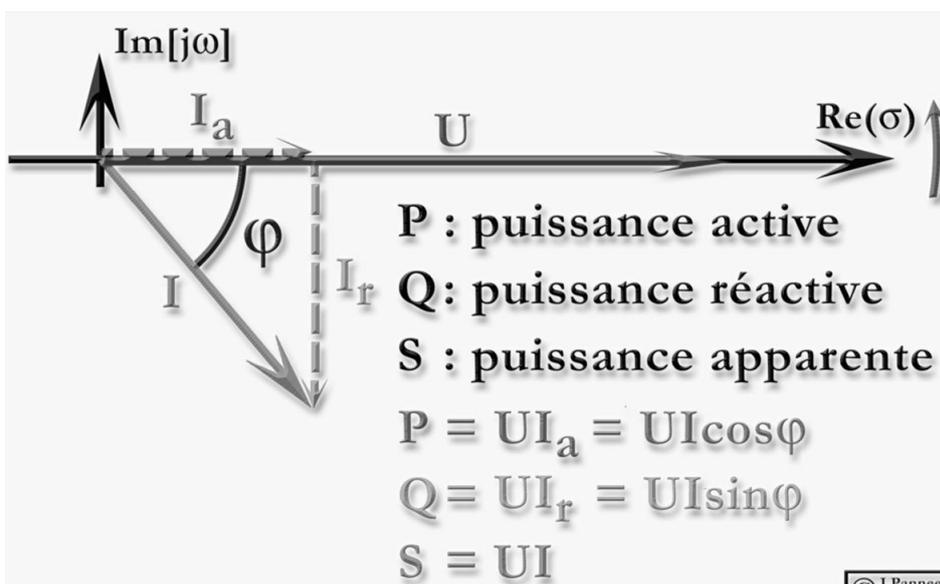
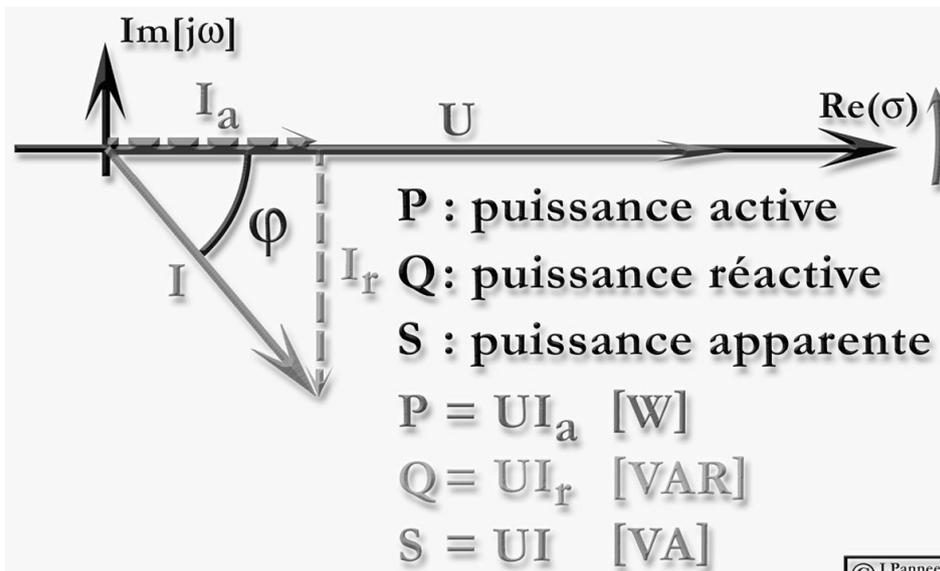
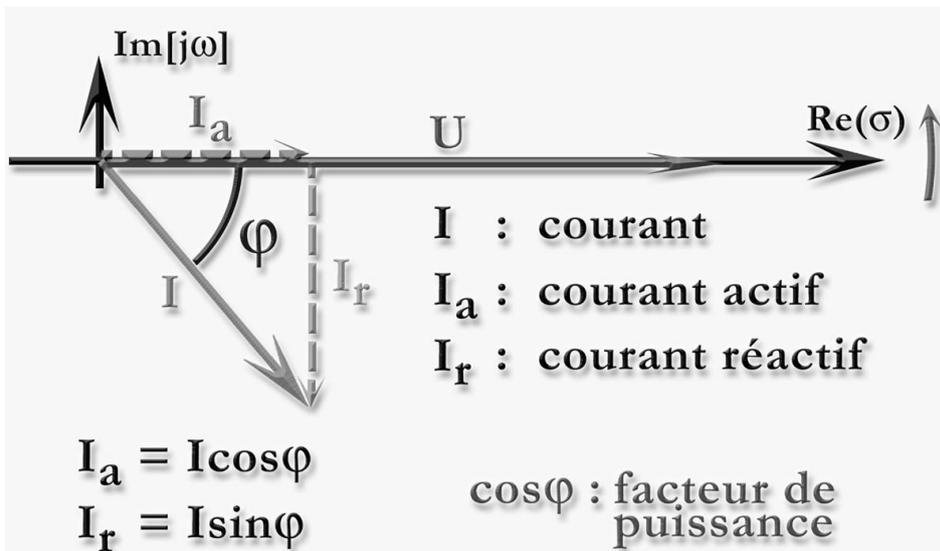
Soit, plus rarement, on connaît, la valeur efficace de l'intensité du courant I qui traverse effectivement le dipôle :

$$P = R \cdot I^2$$

Puissance en alternatif en régime

Diagramme général :



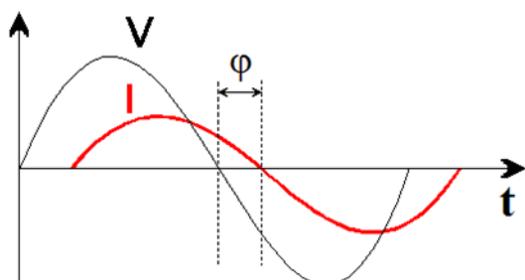


Facteur de puissance et cos phi

On sait que la puissance active vaut :

$$P = U.I.\cos\phi = S.\cos\phi$$

$\cos\phi$ est le facteur de puissance du circuit



- si circuit résistif : $\cos\phi = 1$
- si circuit purement inductif ou capacitif : $\cos\phi = 0$

Ce facteur de puissance dépend donc directement du déphasage entre courant et tension, et est compris entre 1 et 0.

Plus il est proche de 1, plus la situation est idéale du point de vue de la distribution de l'énergie.

Si la forme d'onde n'est plus sinusoïdale et/ou la charge non linéaire, alors le facteur de puissance n'est plus égal au $\cos\phi$ mais il est défini par :

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

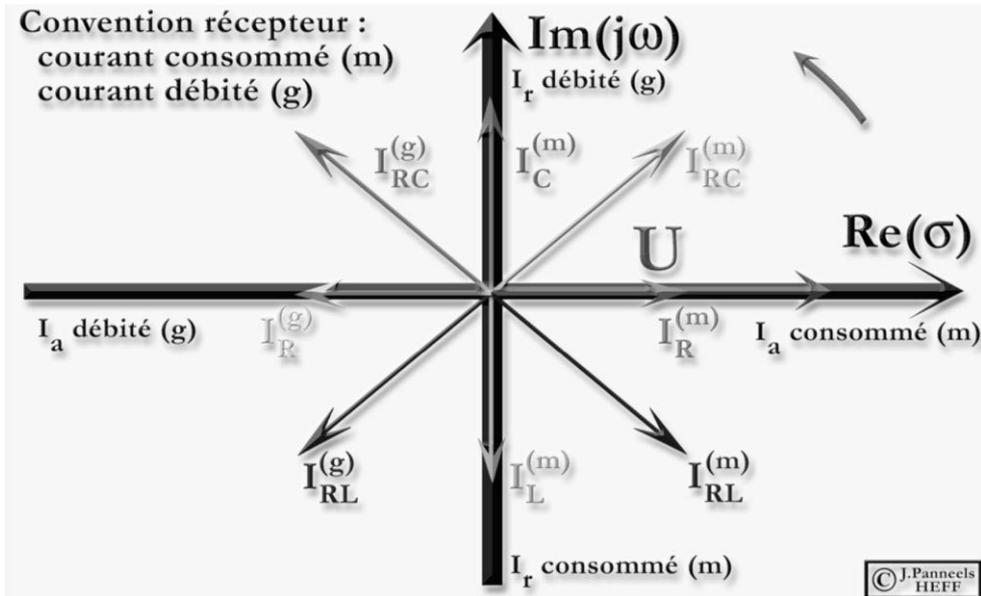
FACTEUR DE PUISSANCE DES PRINCIPAUX RÉCEPTEURS

RECEPTEUR	COS ϕ	TG ϕ
Moteurs asynchrones ordinaires chargés à	0 %	5,80
	25 %	1,52
	50 %	0,94
	75 %	0,75
	100 %	0,62
Lampes à incandescence	approx. 1	approx. 0
Lampes fluorescentes	approx. 0,5	approx. 1,73
Lampes à décharge	0,4 to 0,6	approx. 2,29 to 1,33
Fours à résistance	approx. 1	approx. 0
Fours à induction compensée	approx. 0,85	approx. 0,62
Fours diélectriques	approx. 0,85	approx. 0,62
Machines à soudage à résistance	0,8 to 0,9	0,75 to 0,48
Postes statiques monophasés de soudage à l'arc	approx. 0,5	approx. 1,73
Postes à soudage rotatifs	0,7 to 0,9	1,02 to 0,48
Transformateurs-redresseurs de soudage à l'arc	0,7 to 0,8	1,02 to 0,75
Fours à arc	0,8	0,75
Redresseurs de puissance à thyristors	0,4 to 0,8	2,25 to 0,75

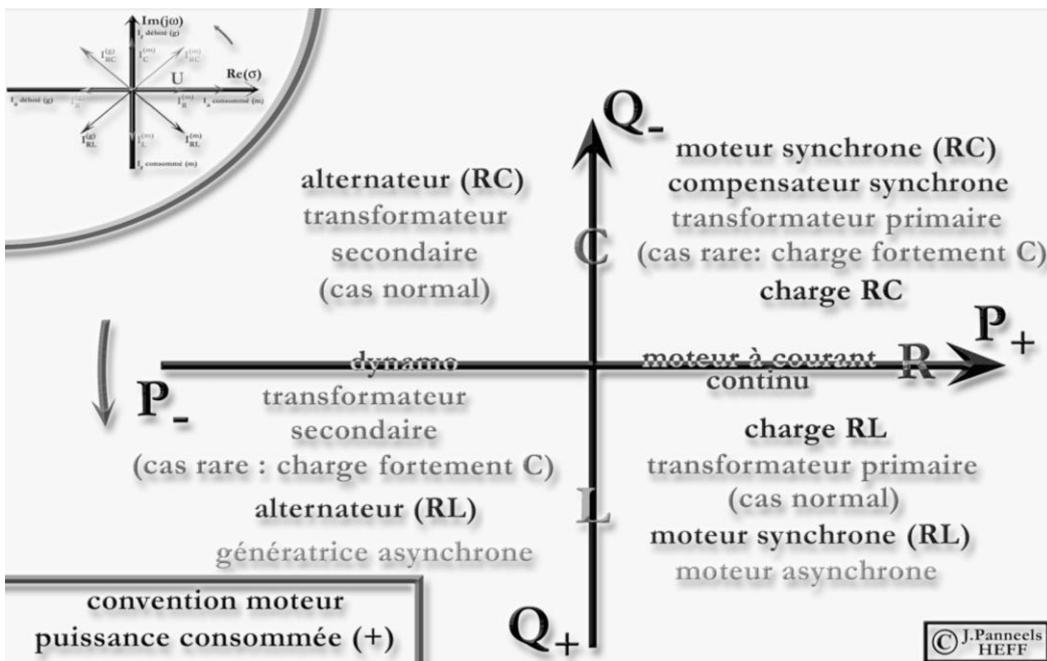
Les récepteurs consommant le plus d'énergie réactive sont :

- les moteurs à faible charge
- les machines à souder
- les fours à arc et induction
- les redresseurs de puissance

Convention pour le sens du courant par rapport à la tension

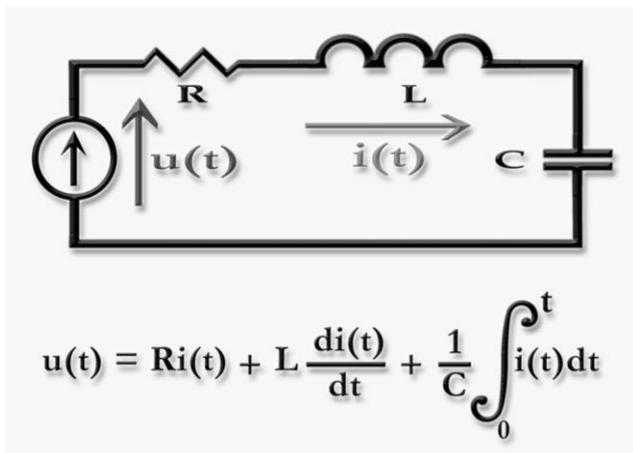


Exemple de récepteurs et positionnement sur ce diagramme

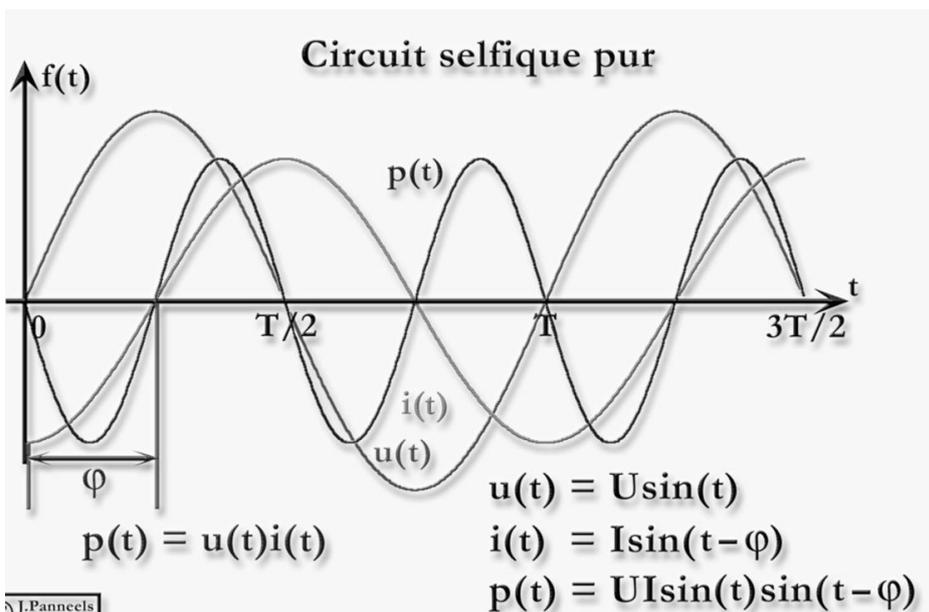
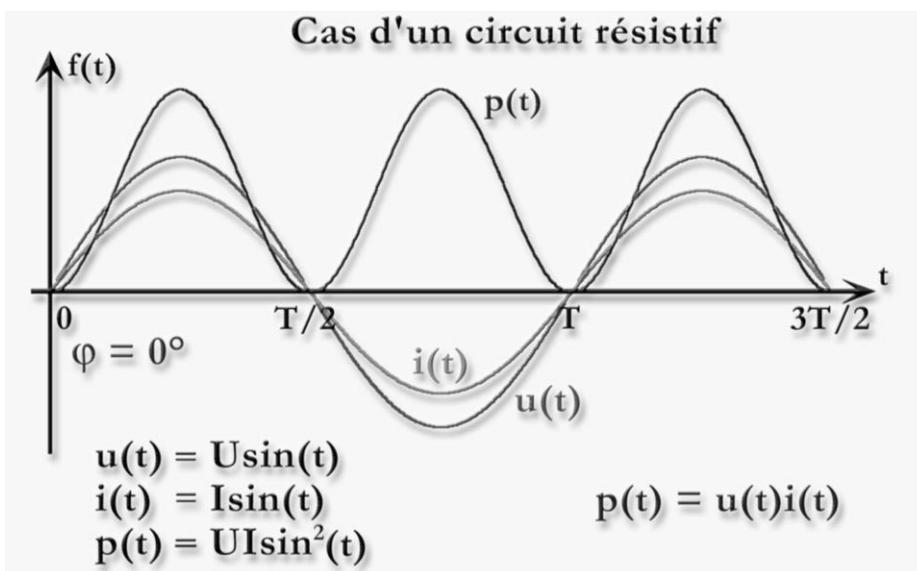


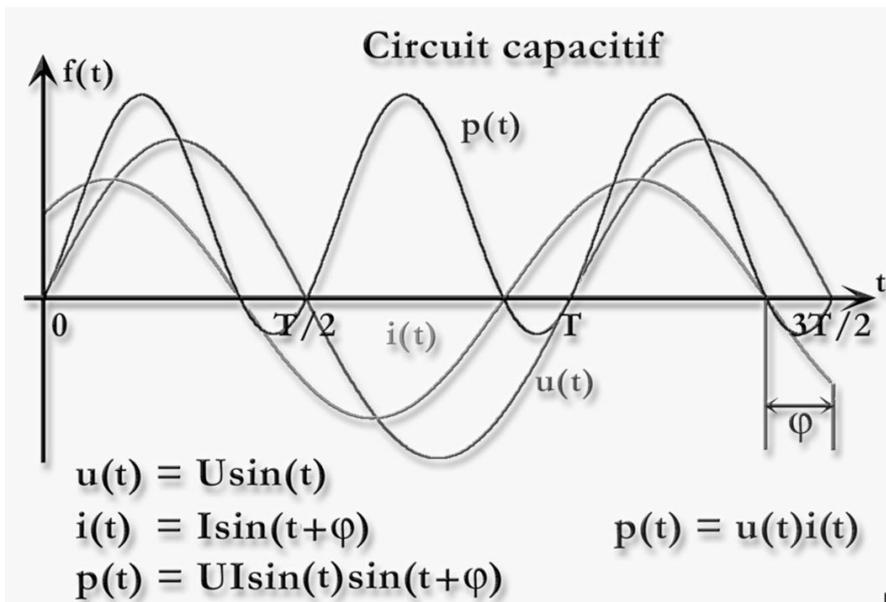
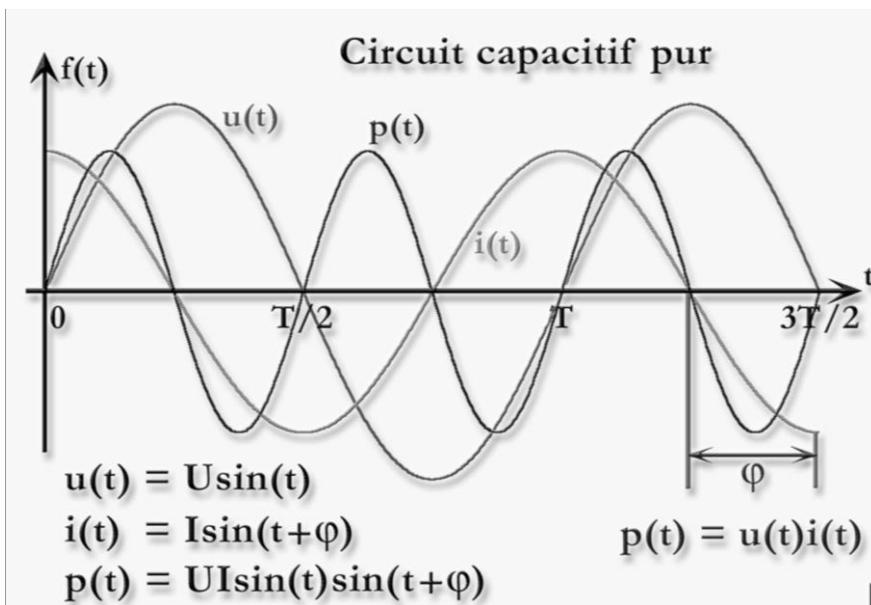
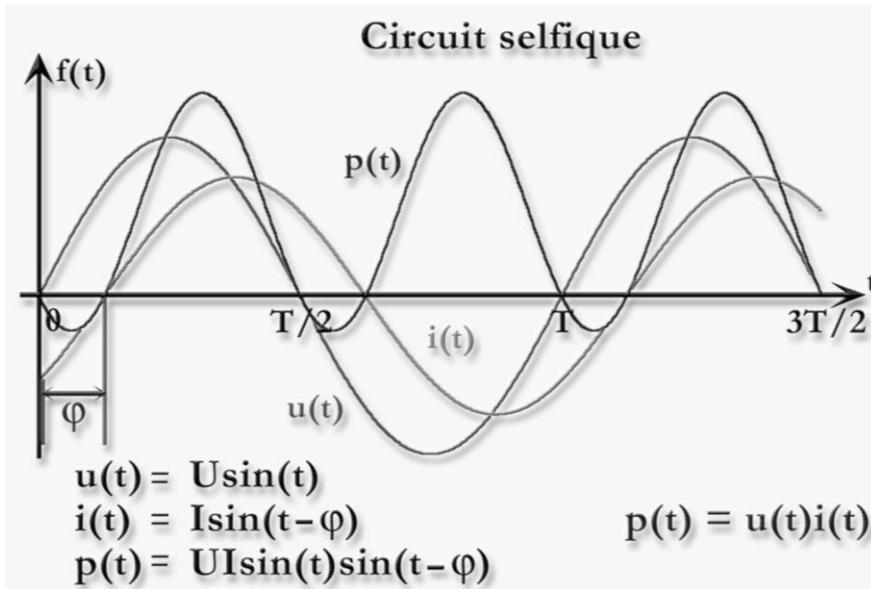
Puissance en alternatif et en transitoire

Cas général :

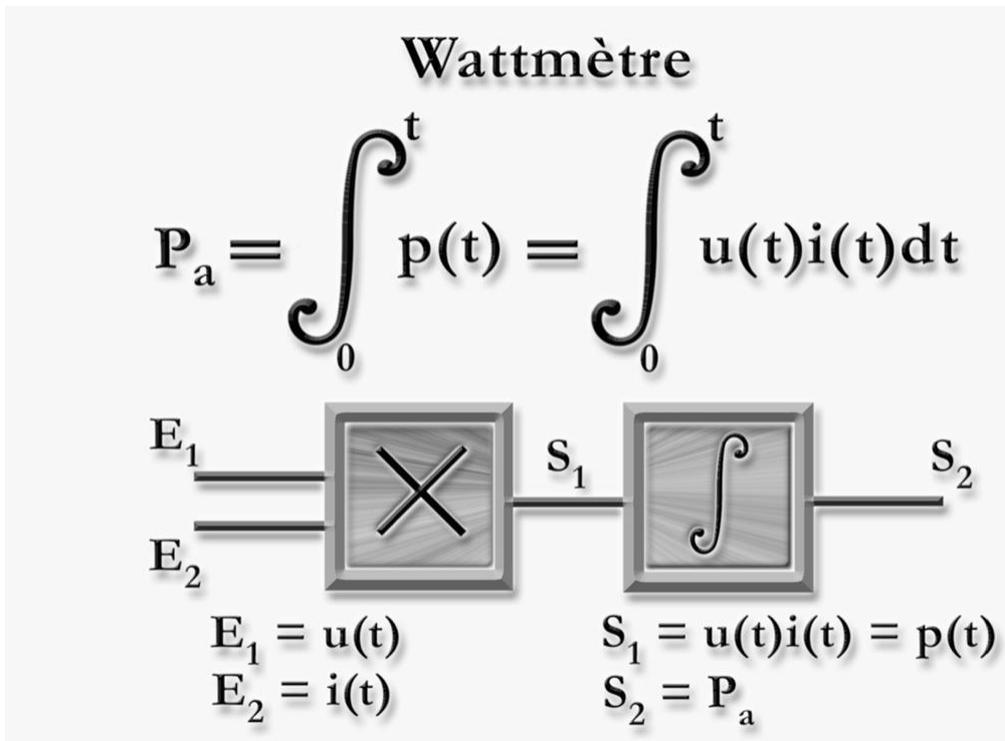
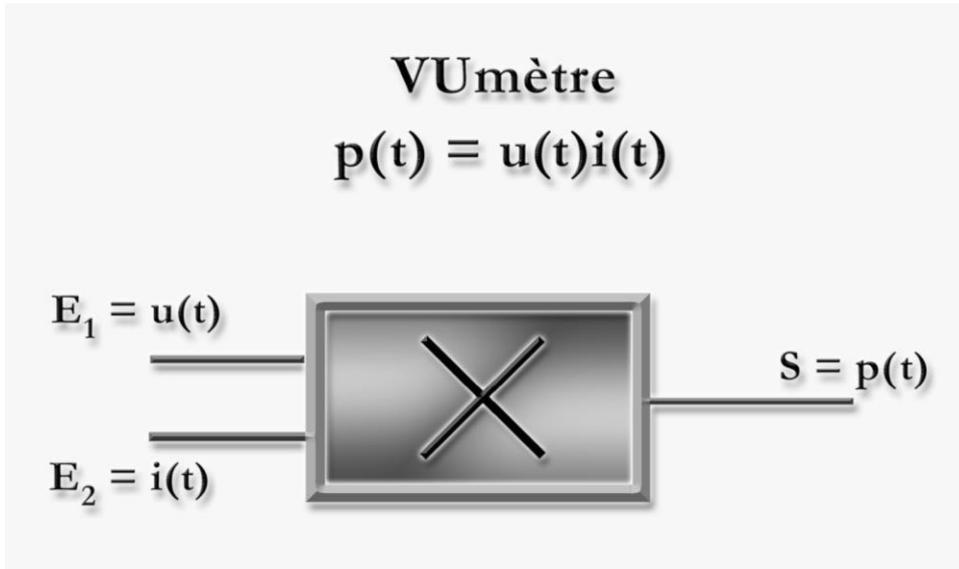


Exemples :





Mesure de la puissance



En sinusoidal [$P_a = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} p(\omega t) d\omega t$]

$$P_a = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} p(\omega t) d\omega t = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} U \sin(\omega t) I \sin(\omega t + \varphi) d\omega t$$

$$P_a = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} p(\omega t) d\omega t = \frac{UI}{2\pi} \int_0^{2\pi} \sin(\omega t) \sin(\omega t + \varphi) d\omega t$$

$$P_a = \frac{UI}{2\pi} \int_0^{2\pi} \sin(\omega t) \sin(\omega t + \varphi) d\omega t$$

Or $\sin(\omega t + \varphi) = \sin(\omega t) \cos(\varphi) + \cos(\omega t) \sin(\varphi)$

$$P_a = \frac{UI}{2\pi} \int_0^{2\pi} [\sin^2(\omega t) \cos(\varphi) + \sin(\omega t) \cos(\omega t) \sin(\varphi)] d\omega t$$

Mais $\int_0^{2\pi} [\sin(\omega t) \cos(\omega t) \sin(\varphi)] d\omega t = 0$

Donc $P_a = \frac{UI}{2\pi} \int_0^{2\pi} \sin^2(\omega t) \cos(\varphi) d\omega t$

© J.Panne HEFI

$$P_a = \frac{UI}{2\pi} \int_0^{2\pi} \sin^2(\omega t) \cos(\varphi) d\omega t$$

$$P_a = \frac{UI}{2\pi} \cos(\varphi) \int_0^{2\pi} \sin^2 \omega t d\omega t$$

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

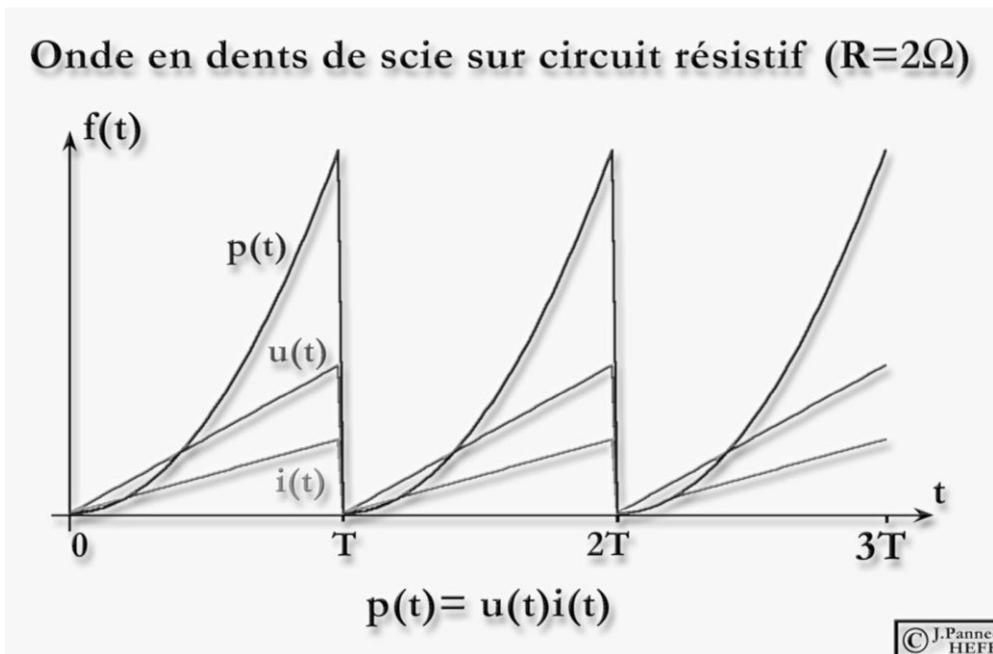
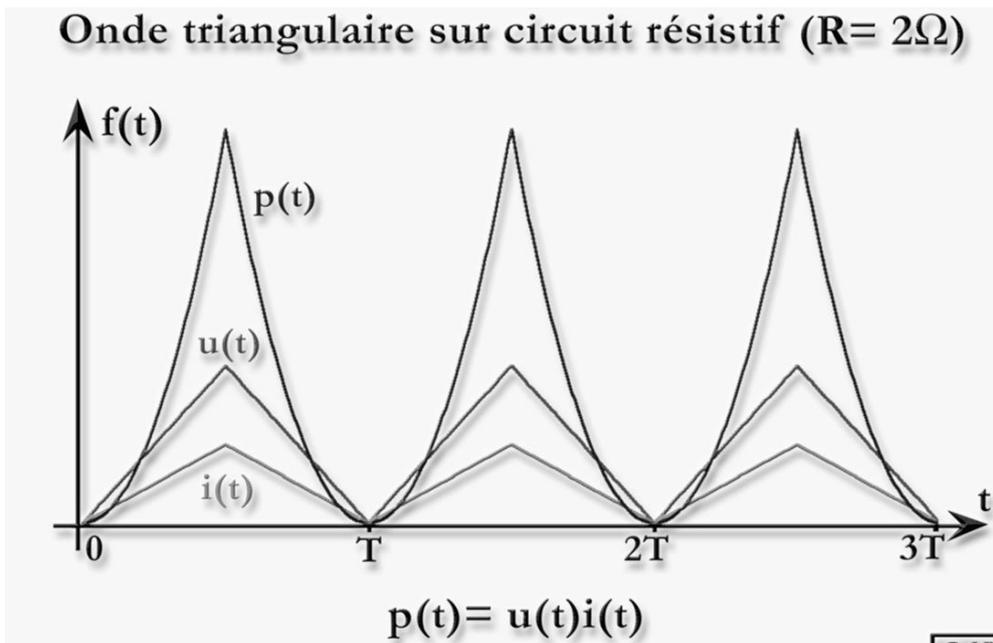
$$P_a = \pi \frac{UI}{2\pi} \cos(\varphi) = \frac{UI}{2} \cos(\varphi)$$

Or $U = \sqrt{2} U_{\text{eff}}$ et $I = \sqrt{2} I_{\text{eff}}$

$$P_a = \frac{\sqrt{2} U_{\text{eff}} \sqrt{2} I_{\text{eff}}}{2} \cos(\varphi) = U_{\text{eff}} I_{\text{eff}} \cos(\varphi)$$

© J.Panne HEFI

Exemple graphiques :



Exercices :

Courants triphasés

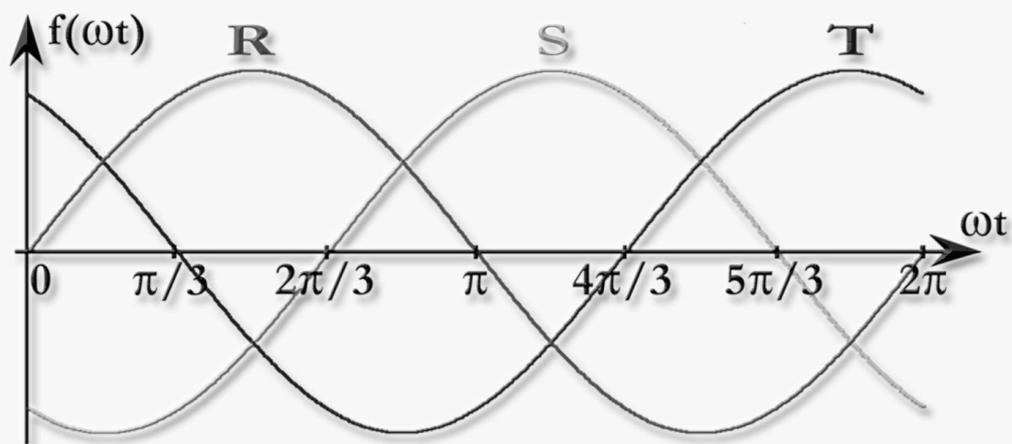
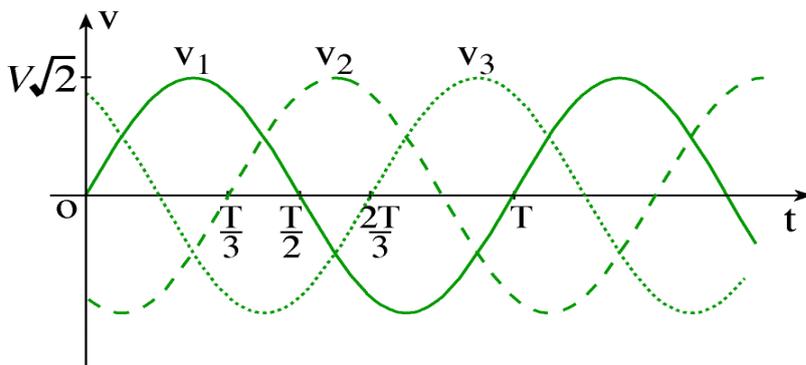
Définition

Les courants **triphases** sont un système composé

- de trois tensions sinusoïdales (3x du monophasé)
- de même fréquence
- de même amplitude

qui sont déphasées entre elles de 120° (un tiers de période, $T/3$.)

Observation des 3 tensions sin à l'oscilloscope



$$\mathbf{R} \rightarrow \sin(\omega t)$$

$$\mathbf{S} \rightarrow \sin(\omega t + 2\pi/3)$$

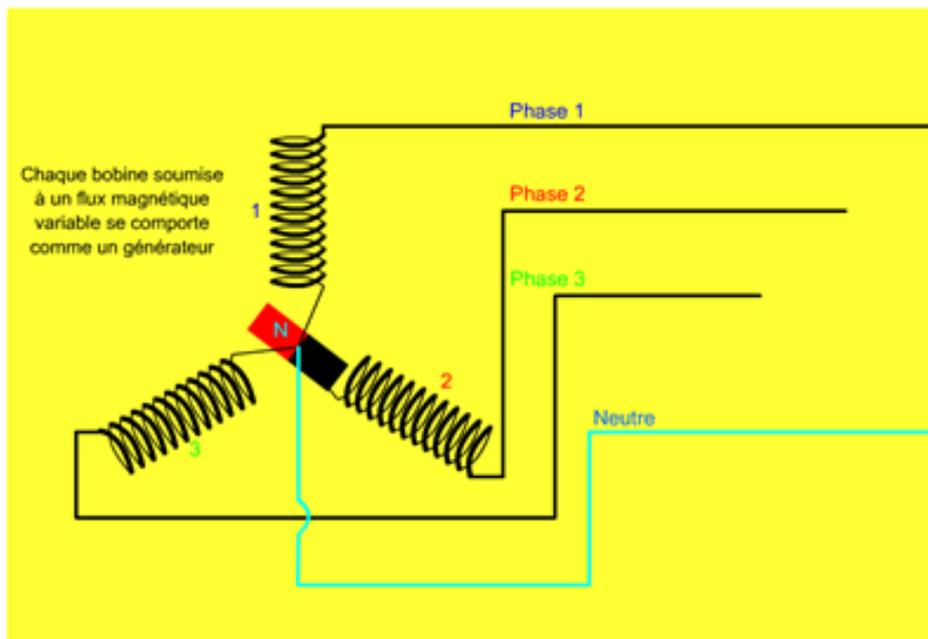
$$\mathbf{T} \rightarrow \sin(\omega t + 4\pi/3)$$

Production d'un courant triphasé :

Alternateur : inducteur (aimant) passant devant 3 bobines décalées de 120°.

Un alternateur triphasé est constitué dans sa forme la plus simple par un inducteur bipolaire (aimant ou électro aimant) animé d'un mouvement de rotation uniforme à l'intérieur de l'induit fixe comportant 3 bobines identiques dont les axes font , entre eux, un angle de 120°.

Chaque bobine crée une force électromotrice (fem) induite alternative.



Avantages par rapport au monophasé

- Les machines triphasées ont des puissances de plus de 50% supérieures aux machines monophasées de même masse et donc leur prix (directement proportionnel à leur masse) est moindre.
- Lors du transport de l'énergie électrique, les pertes sont moindres en triphasé par rapport au monophasé à puissance transmise égale
- Le triphasé offre la possibilité de créer facilement un « champ tournant » qui sera à la base du fonctionnement des moteurs électriques

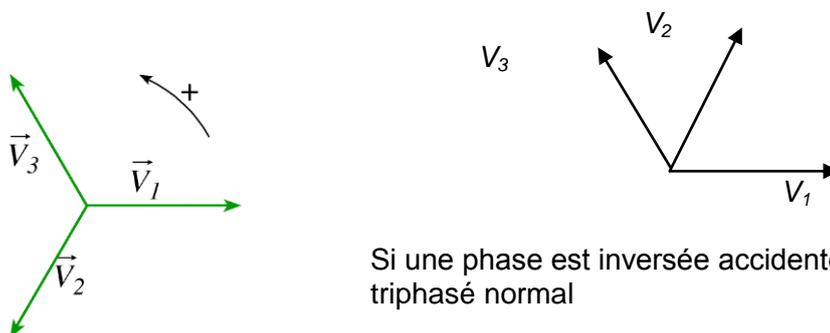
Systeme équilibré et déséquilibré

Systeme équilibré

a) Diagramme Vectoriel

Rappel :

Chaque sinusoïde peut être représentée par un vecteur. Le système triphasé (3x sinusoïdes) peut être représenté par 3 vecteurs décalés de 120°



Si une phase est inversée accidentellement, ce n'est plus du triphasé normal

b) systeme triphasé est EQUILIBREE

Un système triphasé est équilibré lorsque

- les trois conducteurs sont parcourus par **des courants de même valeur efficace***,
- déphasées de 120° l'une par rapport à l'autre

→ Le système est dit *équilibré*.

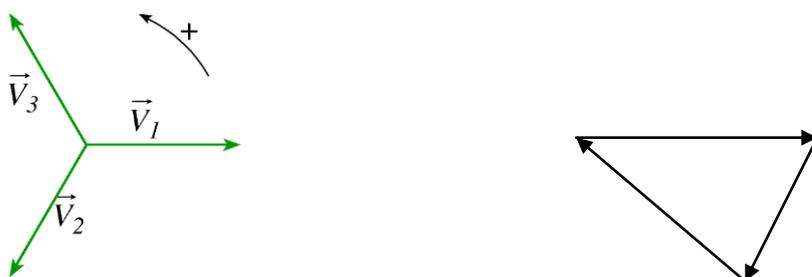
* Récepteurs triphasés équilibrés:

Ce sont des récepteurs constitués de **trois éléments identiques, d'impédance Z. c'est une nécessité pour avoir des I de même valeur efficace.**

c) Théorème fondamental

LA SOMME DES VALEURS INSTANTANEE des 3 fonctions sinusoïdales de même amplitude et déphasées de 120° **EST NULLE.** $V_1 + V_2 + V_3 = 0$

Démonstration vectorielle



En théorie : le fil neutre peut être supprimé car ici il ne passe aucun courant dans le Neutre (en théorie seulement !!!)

Que se passe-t-il dans une maison privée ?

Que se passe-t-il quand on équilibre les phases ?

Que se passe-t-il en industrie ?



EN pratique

Malgré tous les efforts, pour les réseaux industriels, la condition d'équilibre n'est pas réalisée... On a toujours affaire à un système déséquilibré...

LA SOMME DES COURANTS N'EST JAMAIS NULLE ET LE FIL NEUTRE EST INDISPENSABLE !!!!

Système Déséquilibré

a) système déséquilibre AVEC NEUTRE

- Diagramme vectoriel :

Conclusion : Dans un circuit DESEQUILIBRE, le courant dans le neutre n'est PAS NUL

- Quelle est l'intensité dans le fil neutre ?
 - Addition vectorielle : $I_N = I_1 + I_2 + I_3$ on peut dessiner les vecteurs à l'échelle et ensuite mesurer
 - Formules compliquées : $I_N =$

b) Système déséquilibré SANS NEUTRE :

Que se passe t-il si on supprime le neutre ?

Diagramme vectoriel



CONCLUSION !!! ATTENTION DANGER

Il ne faut donc **JAMAIS** supprimer le fil neutre d'un circuit étoile même provisoirement équilibré.
Car en cas de suppression (accidentelle ou non) d'une phase, il y aurait un déséquilibre inadmissible des tensions et les récepteurs risqueraient d'être détériorés

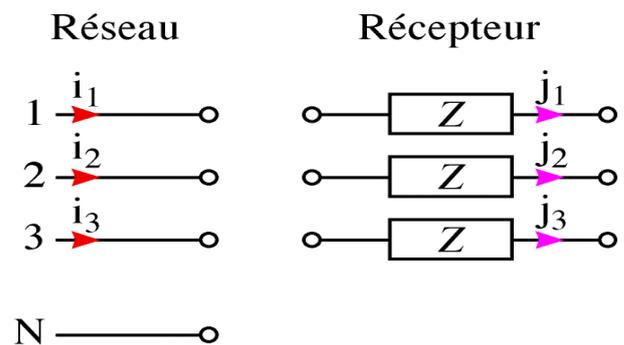
Vocabulaire

Courants par (ou de) phase : c'est le courant qui traverse les éléments Z du récepteur triphasés.

Symbole : J

Courants en (ou de) ligne : c'est le courant dans les fils du réseau triphasé.

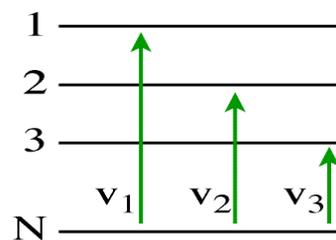
Symbole : I



Tension DE phase : tension entre le N et 1 phase

Symbole : V

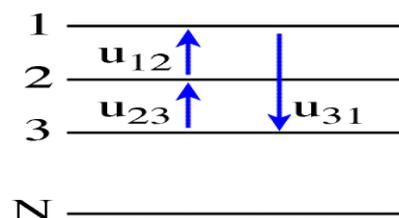
v_1, v_2, v_3 : **tensions simples** entre les phases et le neutre.



Tension ENTRE phases (ou de ligne): tension entre 2 phases

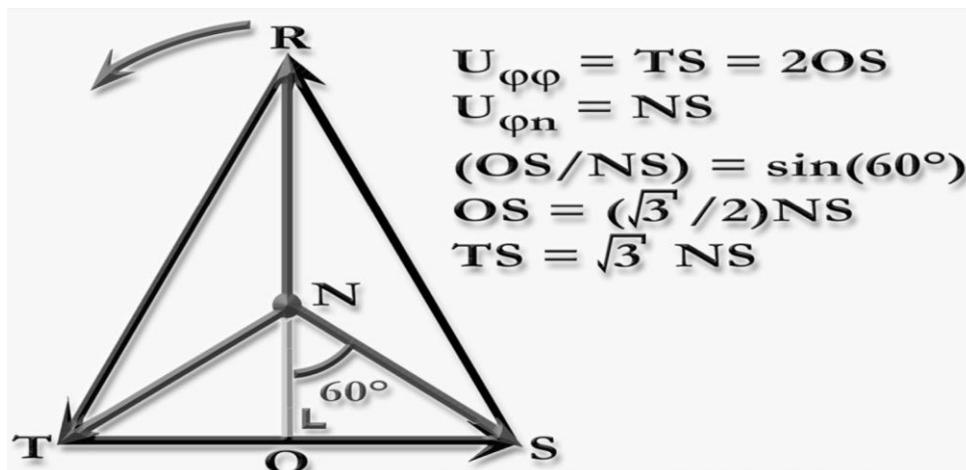
Symbole : U

u_{12}, u_{23}, u_{31} : **tensions composées** entre les phases.



Rapports entre tension de phase et tension entre phases

Diagramme vectoriel des tensions :



$$U_{\phi\phi} = \sqrt{3} U_{\phi n}$$

La tension entre phases est 1,73 fois plus grande que la tension entre phase et neutre

Distribution

La distribution se fait à partir de 4 ou 5 bornes :

- Trois bornes de **phase** repérées par 1, 2, 3 ou A, B, C ou R, S, T ;
- + Une borne **neutre** N (quand il est distribué)
- + Une borne reliée à la Terre

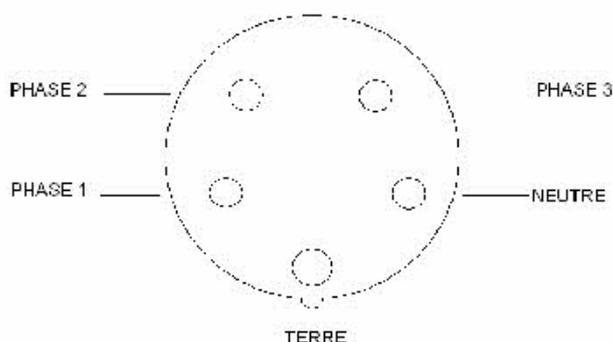
Réseau 230 / 400 signifie que la tension de phase est de 230 V La tension entre phase est 400 V.

Couleur des fils

Jaune vert = terre

Bleu = neutre

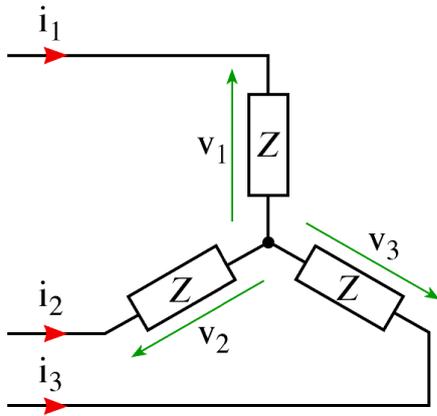
Brun ou noir ou gris pour les phases



Les couplages

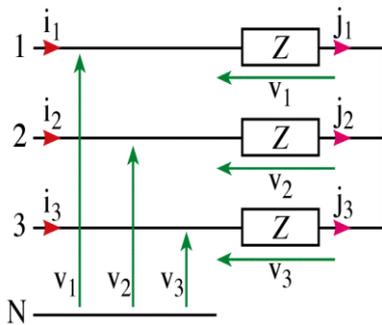
a) Couplage étoile

Etoile (ici 3 fils SANS Neutre)



Même branchement représenté de deux façons différentes.
Le premier schéma explique le terme « étoile ».

Autre façon de dessiner le même schéma :



Relations mathématiques :

$$\begin{aligned}
 I &= J \\
 U &= V * 1,73 \\
 P &= 1,73 * U * I * \cos f \\
 S &= 3 * V * J = 1,73 * U * I
 \end{aligned}$$

Remarque :

Dans le montage étoile, il y a

- un système d'intensité et
- 2 systèmes de tensions (ce qui est intéressant)

Symbole :

Démonstration de la Relation entre U et V :

Considérons 2 triangles rectangles

L'angle entre les phases est de $120^\circ \rightarrow 30^\circ$ entre U et V

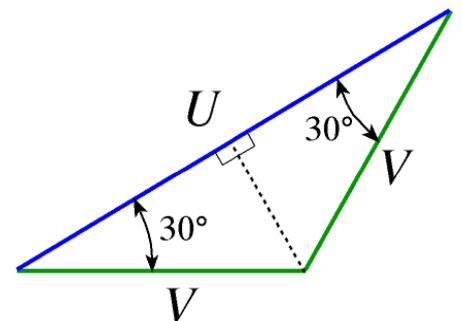
Appliquons la définition du cosinus à l'un des triangles :

$$\cos 30^\circ = 0,86 = (U/2) / V$$

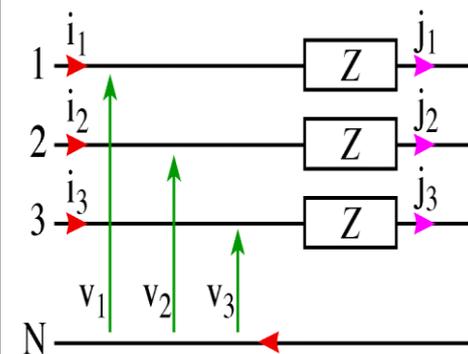
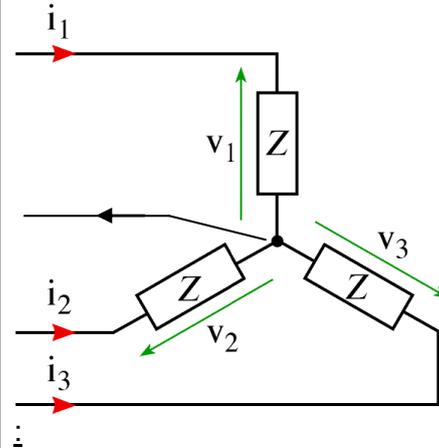
$$U/2 = V * 0,86$$

$$NB : 2 * 0,86 = 1,73 = \text{racine de } 3$$

$$\rightarrow U = V * \text{racine de } 3$$

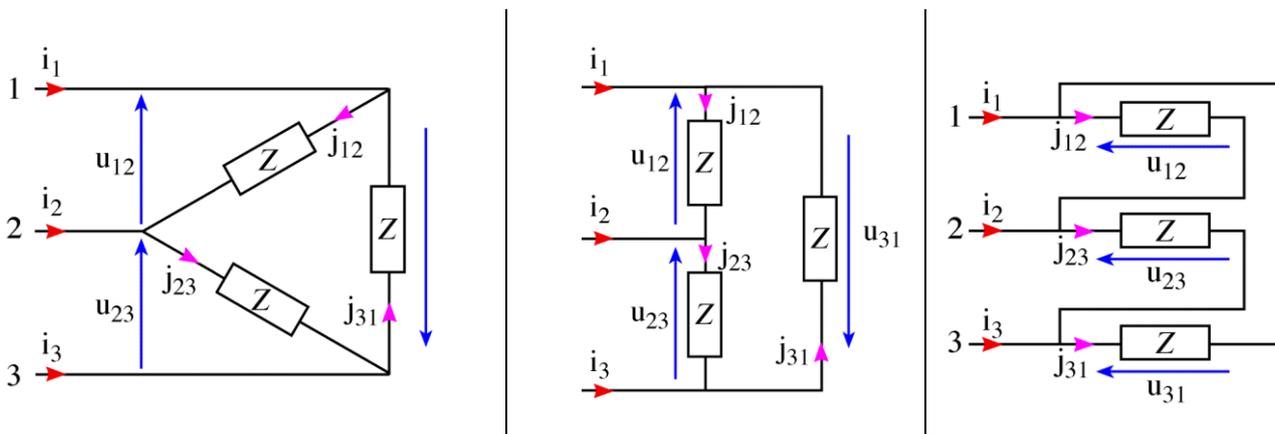


Etoile : 4 fils AVEC NEUTRE



b) Couplage t triangle

Même branchement représenté de trois façons différentes.
Le premier schéma explique le terme « triangle »



Symbole :

Relations mathématiques :

Couplage triangle :

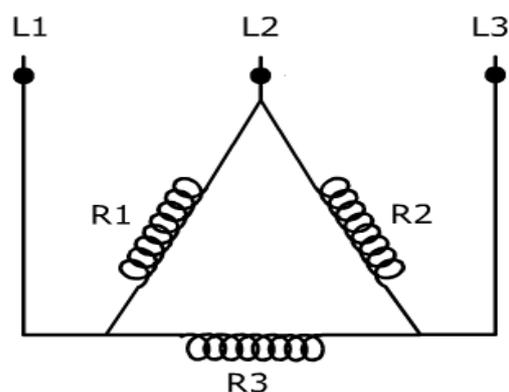
$$U = V$$

$$I = J * \text{racine de } 3$$

$$I = J * 1,73$$

$$P = 1,73 * U * I * \cos \phi$$

$$S = 3 * V * J = 1,73 * U * I$$



Symbole :

Remarques importantes :

1) U et I

Souvent le montage interne d'un appareil est inconnu. On ne voit que les fils de ligne connecté au réseau.

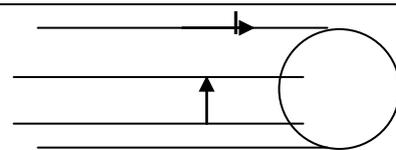
Nous ne pouvons alors que connaître

- La tension de ligne U
- Le courant de ligne I

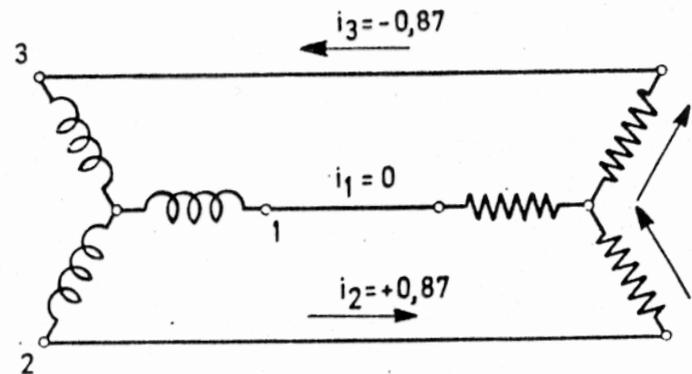
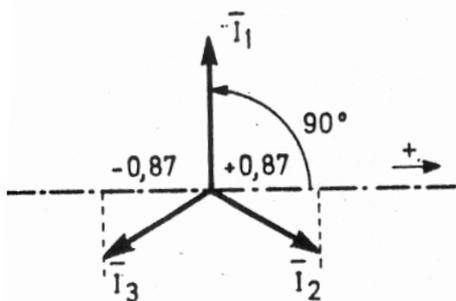
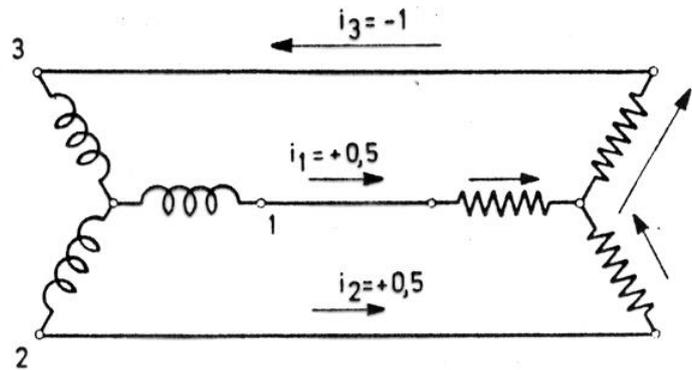
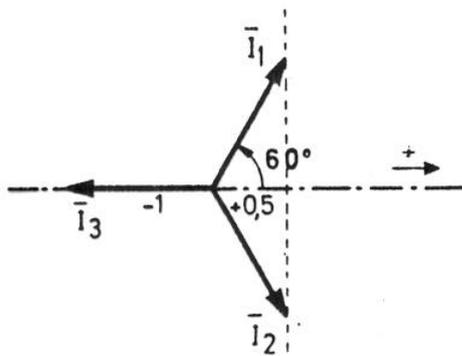
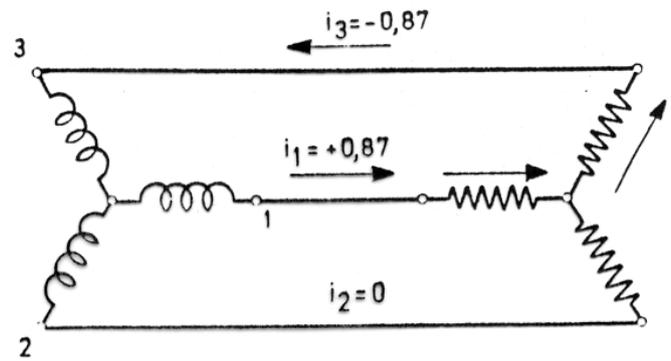
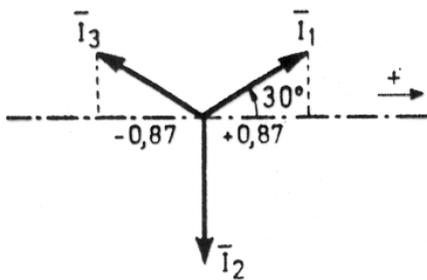
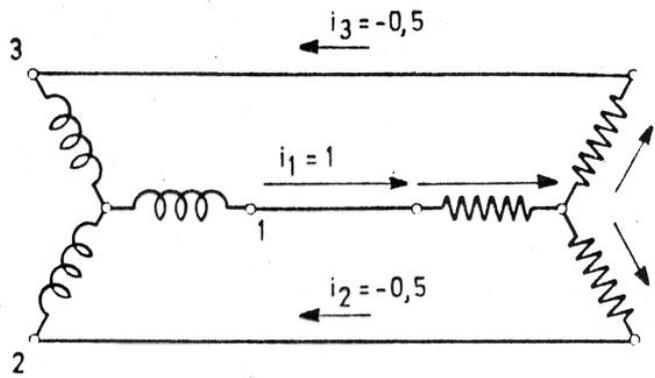
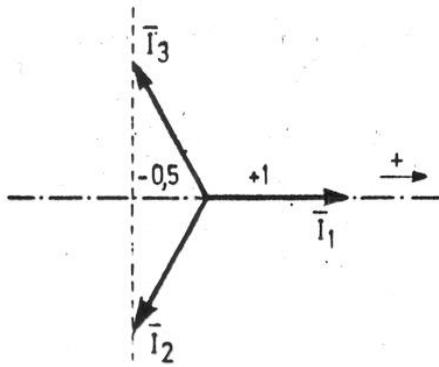
Ce sont eux U et I qui sont utilisés pour les calculs de la puissance, plaque signalétique, etc...

2) indépendance des circuits :

Dans un montage étoile avec Neutre et dans un montage triangle, les 3 récepteurs fonctionnent indépendamment les uns des autres.

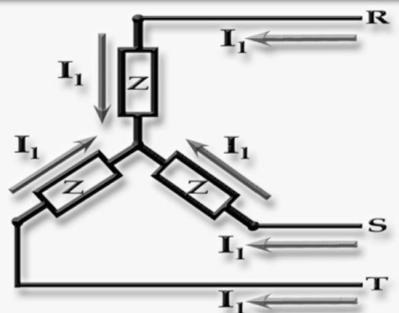


Somme des courants en étoile :

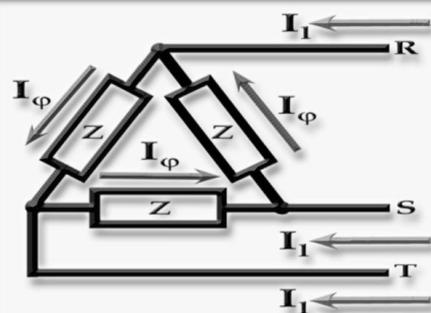


Synthèse :

En étoile :



$P = 3U_{\varphi n} I_1 \cos(\varphi)$



$P = 3U_{\varphi\varphi} I_{\varphi} \cos(\varphi)$

Si $P = 3 P_{(1 \text{ phase})} = \text{cte}$

$P = 3U_{\varphi n} I_1 \cos(\varphi) = 3U_{\varphi\varphi} I_{\varphi} \cos(\varphi)$

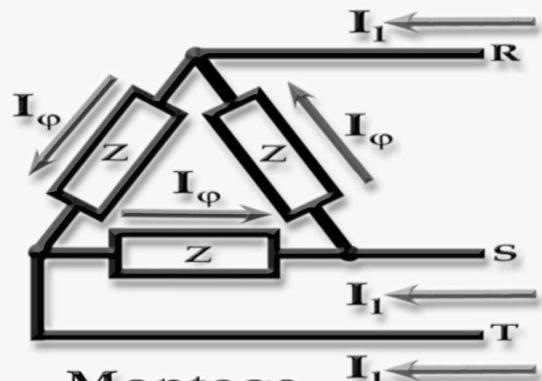
Donc $I_1 = (U_{\varphi\varphi} / U_{\varphi n}) I_{\varphi}$

Or $U_{\varphi\varphi} = \sqrt{3} U_{\varphi n}$

$I_1 = \sqrt{3} I_{\varphi}$

© J.Panneels HEFF

En triangle :

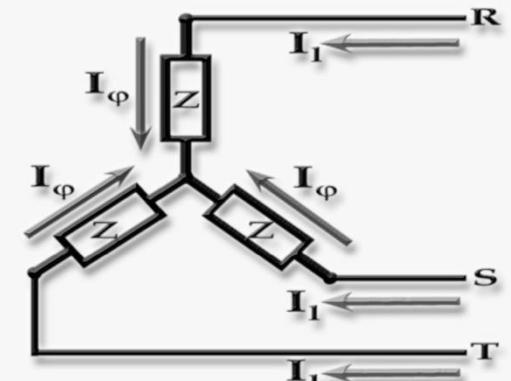


Montage en triangle

$I_1 \neq I_{\varphi}$

Si le système est équilibré

$I_1 = \sqrt{3} I_{\varphi}$



Montage en étoile

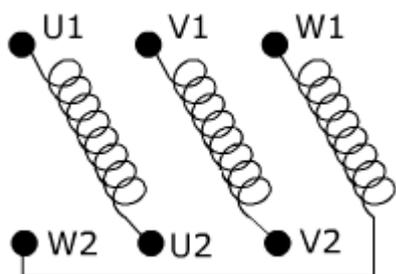
$I_1 = I_{\varphi}$

$I_{\varphi} \uparrow$ courant de phase $I_1 \uparrow$ courant de ligne

© J.Panneels HEFF

Plaque à bornes

Voici la plaque à bornes d'un moteur triphasé avec ses 3 enroulements.



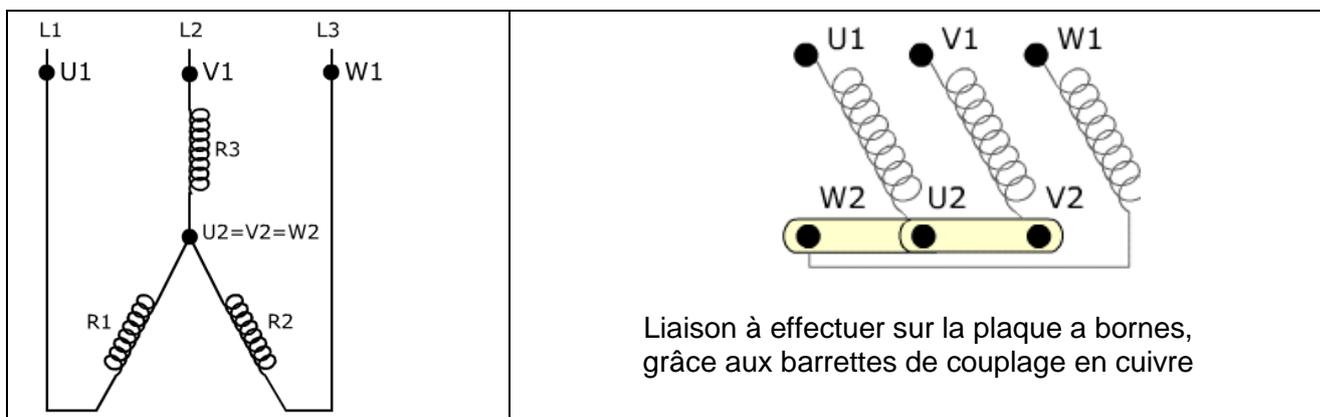
- 1er enroulement entre : U1 et U2
- 2ème enroulement entre : V1 et V2
- 3ème enroulement entre : W1 et W2

Ceux ci sont disposés en biais afin de faciliter le raccordement selon le couplage souhaité.

Couplage triangle



Couplage étoile

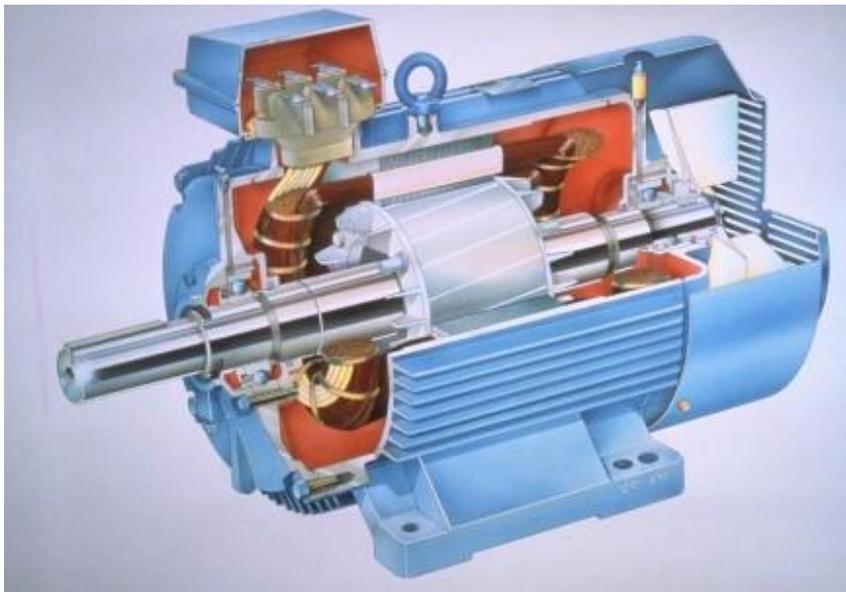


Extrait de :

<http://semopyworld.free.fr/index.php?file=Sections&op=article&artid=13#Les%20couplages%20de%20moteur%20triphase%C3%A9%20>

Plaques à bornes réelles





La plaque à bornes se situe dans le boîtier rectangulaire qui surplombe le moteur et d'où sort un passe-câble.



Choix du couplage :

Selon la tension du réseau les moteurs peuvent être couplés de 2 manières différentes.

Sur la plaque a bornes 2 tensions sont inscrites;

-La 1ere correspond a la tension pour un moteur couplé en triangle, c'est toujours la plus petite des 2.

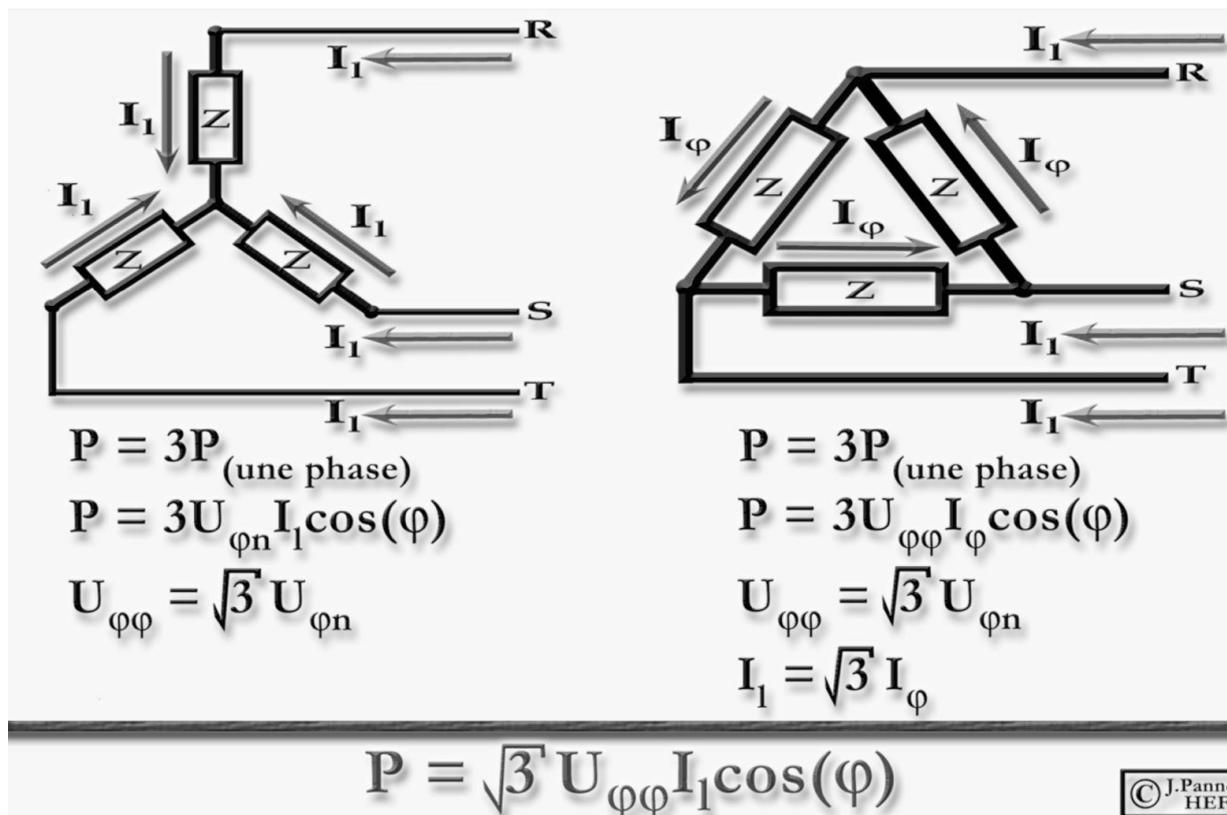
-La 2nd correspond a la tension pour un moteur couplé en étoile, c'est toujours la plus grande des 2.

Afin de trouver le couplage, il suffit juste de savoir la tension triphasée du réseau. Une fois que vous avez celle ci, prenez la tension proposé sur le moteur a correspondant celle du réseau, la position et la valeur de celle ci déterminent le couplage a faire

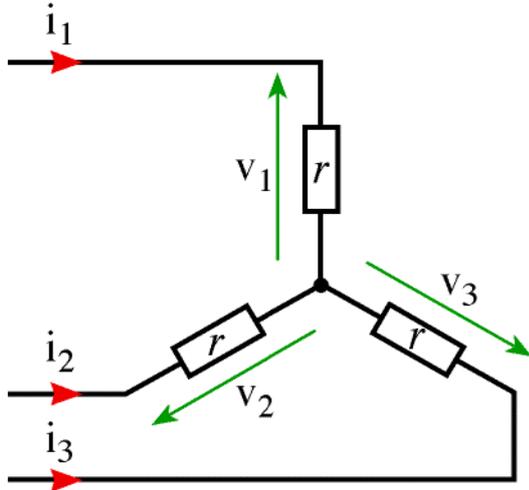
Une fois que vous l'avez trouvé, il ne vous reste plus qu'a réaliser le couplage du moteur.

Attention, certains moteurs ne peuvent pas être raccordés directement sur certains réseaux (tension trop faible ou trop élevée).

Puissance en triphasé



Pertes joules en couplage étoile:



Considérons uniquement la partie résistive du récepteur.

Pour une phase du récepteur :

$$P_{J1} = rI^2$$

Résistance vue entre deux bornes :

$$R = 2r$$

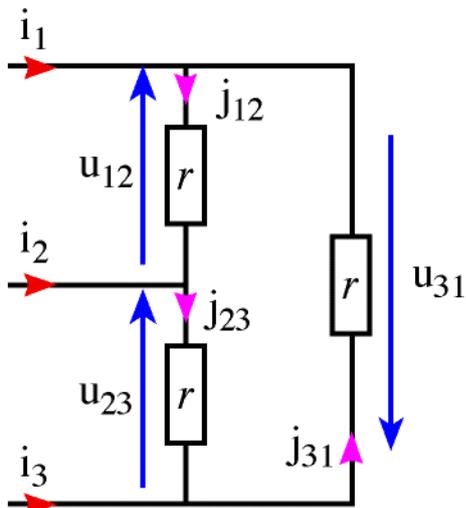
Pour le récepteur complet :

$$P = 3 \cdot P_{J1} = 3rI^2 = \frac{3}{2} RI^2$$

Finalement pour le couplage étoile :

$$P = \frac{3}{2} RI^2$$

Pertes joules en couplage triangle:



On mesure r avec un ohmmètre entre deux phases et hors tension.

Détail du calcul de la résistance équivalente vue entre deux bornes du récepteur :

nous avons $2r$ en parallèle avec r ;

$$R = \frac{2r \cdot r}{2r + r} = \frac{2}{3} r$$

Pour une phase du récepteur :

$$P_{J_1} = rJ^2$$

Résistance vue entre deux bornes :

$$R = \frac{2}{3} r$$

Pour le récepteur complet :

$$P = 3 \cdot P_{J_1} = 3rJ^2 = 3 \frac{3}{2} R \left(\frac{I}{\sqrt{3}} \right)^2 = \frac{3}{2} RI^2$$

Finalement pour le couplage étoile :

$$P = \frac{3}{2} RI^2$$

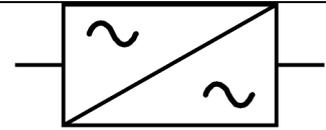
Transformateur

But d'un transformateur :

Le transformateur est un **convertisseur statique** (pas de pièce en mouvement).

Il transforme une tension sinusoïdale en une autre tension sinusoïdale de valeur efficace différente. **AC / AC.**

Le transformateur ne fait **JAMAIS** de redressement



Les deux fonctions importantes sont

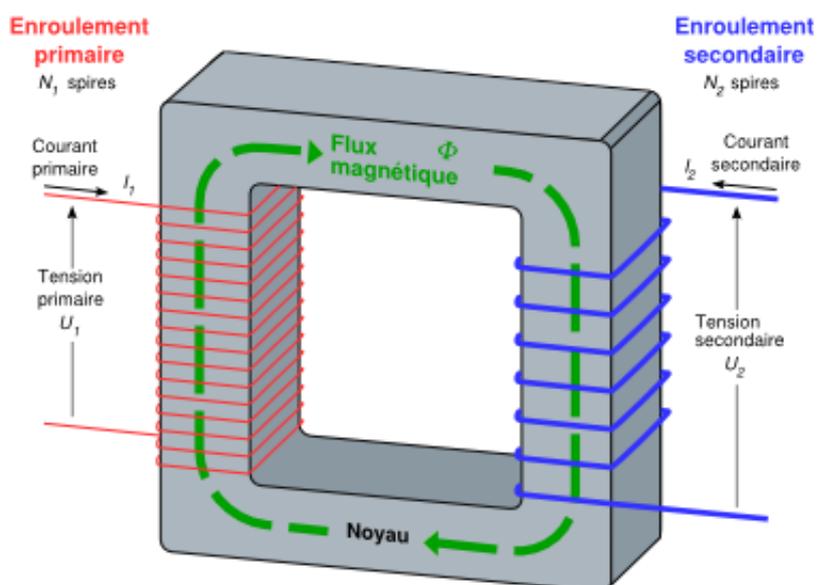
- a) L'isolation électrique du primaire vis-à-vis du secondaire et
- b) la modification de la tension efficace ou du courant efficace AC

Avantages

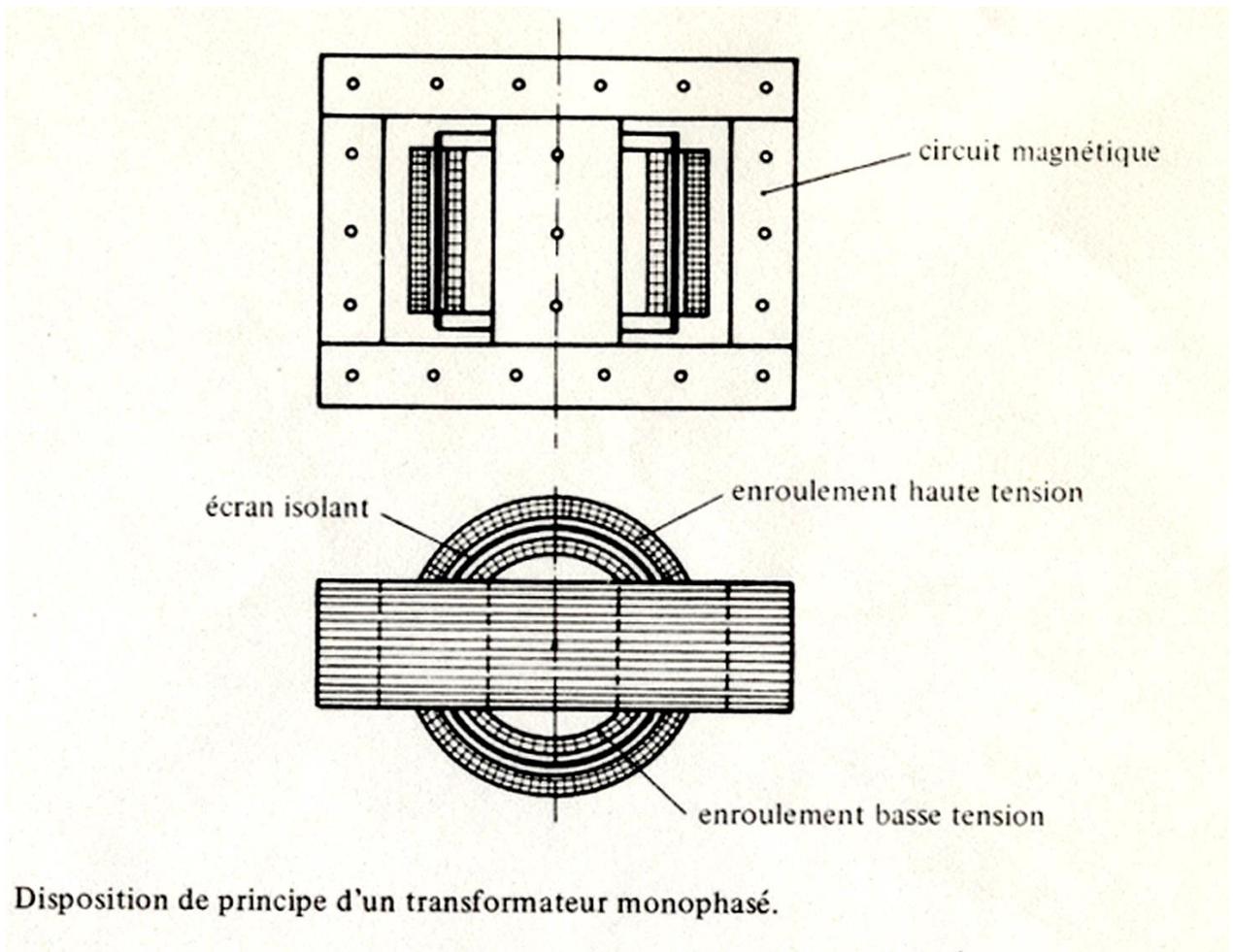
- Usure insignifiante (aucun organe en mouvement)
- Entretien réduit
- Excellent rendement

TRANSFORMATEUR MONOPHASE

Constitution

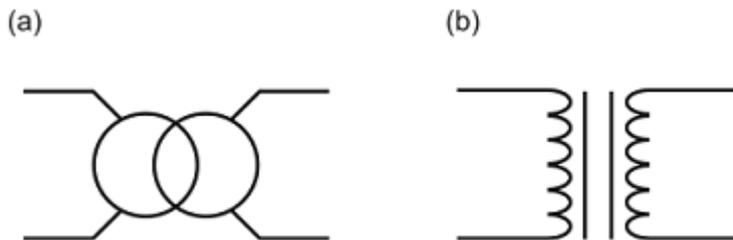


Le transformateur se compose de deux bobines (une primaire de n_1 spires et une secondaire de n_2 spires) et d'un circuit magnétique pour canaliser le flux



Disposition de principe d'un transformateur monophasé.

Symboles :



Principe de fonctionnement

A vide

Lorsque le primaire est relié au secteur et que le secondaire n'est relié à aucun circuit (on dit qu'il est **ouvert**), comme sur la figure 2 ; dans ces conditions, on dit que le transformateur fonctionne à **vide**, parce que son secondaire ne fournit aucun courant.

Note : Tous les symboles avec l'indice 0 sont des valeurs mesurées à vide

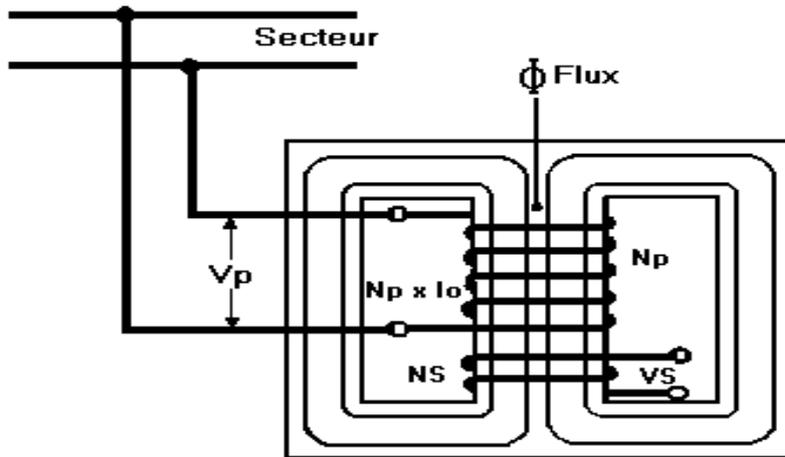


Fig. 2. - Transformateur fonctionnant à vide.

a) Au primaire : (= récepteur)

- Le seul courant qui circule dans le transformateur est celui qu'absorbe le primaire relié au secteur ; ce courant, quand il parcourt l'enroulement, aimante le noyau, c'est pourquoi on l'appelle **courant magnétisant**. (I_0)
- Si l'on indique par N_p le nombre de spires du primaire et par I_0 le courant magnétisant, on obtient une **f.m.m.**, donnée par le produit $N_p \times I_0$, qui produit le flux Φ dans le noyau

Rappel : Tension alternative (courant car circuit fermé) à travers la bobine

→ champ magnétique variable à travers le noyau

b) Circuit magnétique

Le circuit magnétique sert à canaliser le flux magnétique (autrement il se disperserait et le rendement du transfo serait presque nul)

La tension alternative primaire produit dans le noyau magnétique un flux alternatif (50 X par seconde dans un sens puis dans l'autre pour une fréquence de 50 Hz)

c) Au secondaire : (= générateur à vide)

champ magnétique variable traversant la bobine du secondaire

→ Tension induite dans chaque spire du secondaire
 → Polarité de la tension induite : est telle que si le circuit est fermé, le flux créé par courant induit s'oppose au flux principal

Valeur de la tension induite dans 1 spire :

$$E = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

E : f.e.m. induite en V

$\Delta\Phi$: Variation du flux d'induction en Wb

Δt : Durée de la variation en S

On multiplie la fem E par le nombre de spires (N) pour connaître la tension aux bornes du secondaire : $E = N \frac{d\Phi}{dt}$

En charge

Le transformateur fonctionne en charge lorsque son secondaire est relié à consommateur de courant (par ex : une résistance) dans un circuit fermé. Le consommateur de courant est appelé charge.

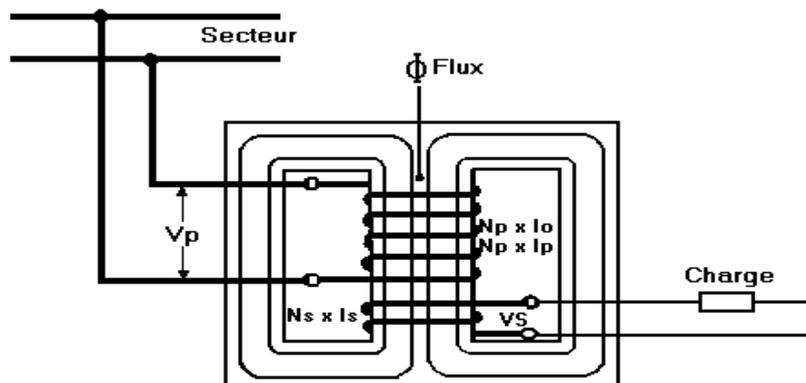


Fig. 5. - Transformateur fonctionnant en charge.

On continue le raisonnement commencé à vide :

Secondaire (suite) = générateur en charge

Si le circuit secondaire est fermé sur une charge, un courant induit circule dans cette charge	→ Le courant induit variable crée un flux opposé au flux principal
--	--

Le courant de charge circulant dans les spires du secondaire, produit à son tour un flux d'induction qui s'oppose (selon la loi de LENZ, à la cause qui l'a engendré) au flux principal.

On pourrait donc penser que le flux secondaire produit par le courant secondaire en s'opposant au flux principal, rend impossible le fonctionnement du transformateur.

Mais au contraire, dès que commence la circulation du courant secondaire (I_s) et donc que le flux secondaire se produit, le primaire prend au réseau un nouveau courant supplémentaire, et produit ainsi à son tour un flux primaire supplémentaire qui, à chaque instant, est égal et opposé à celui que produit le courant secondaire et en neutralise ainsi l'effet.

Quelques remarques :

1) Les variations de flux donnent naissance, dans le circuit secondaire à une tension induite de **même fréquence** que la tension primaire

Le transfo ne change pas la fréquence du signal

2) **Si un courant continu et non pas alternatif circulait dans le primaire :**

le flux ne varierait pas dans le noyau ; par suite, aucune **f.e.m.** ne s'induirait dans le secondaire et l'on n'obtiendrait aucune tension entre les extrémités de l'enroulement secondaire.

on comprend donc pourquoi :

un transformateur ne peut fonctionner qu'avec le courant alternatif et JAMAIS AVEC LE COURANT CONTINU.

3) **le transfo est auto régulateur de puissance.** Tout appel de puissance au secondaire se transmet intégralement au primaire ...

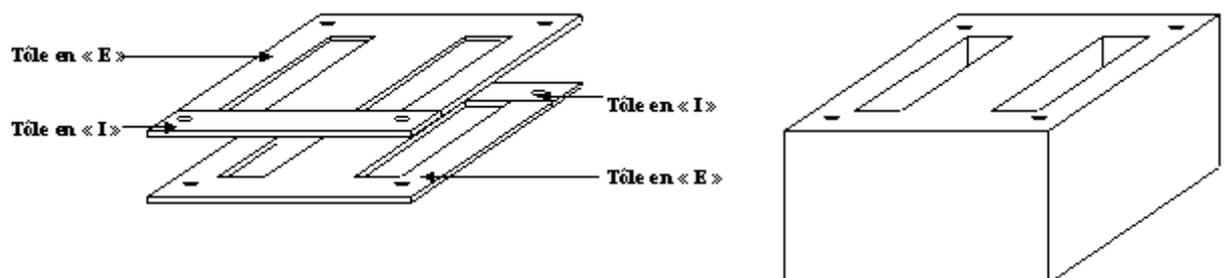
4) En observant les valeurs instantanées $u_1(t)$ et $u_2(t)$, on constate quelles sont en opposition de phase. C'est-à-dire que lorsque u_1 est maximum, u_2 est minimum.

Au point de vue de la transformation d'énergie



Construction

Réalisation du circuit magnétique par empilement de tôles



- Les tôles ont une épaisseur entre 0,4 et 0,7
- L'empilement de plan des tôles en " E " et en " I " avec alternance des joints entre le " E " et le " I " permet de fabriquer le circuit magnétique.
- L'ensemble forme un bloc cohérent quand cet ensemble est collé ou par serrage grâce aux systèmes vis écrous.
- Les plans de tôle sont isolés entre eux par un vernis.
- Ainsi les pertes par courant de Foucault sont limitées.

Les enroulements

Les enroulements primaire et secondaire sont en général concentriques (voir photo). On évite ainsi les flux de fuite en donnant aux deux bobines l'inductance mutuelle maximal.

Sur les schémas les deux enroulements sont dessinés distinctement pour faciliter la compréhension

Flux de fuite.

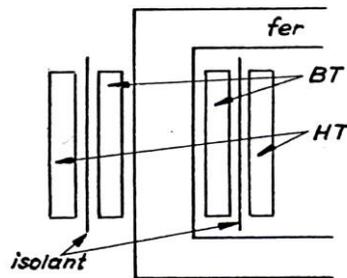


Fig. 301

Section des conducteurs des enroulements

Les spires, généralement en fil de cuivre, sont enroulées sur plusieurs couches superposées, et isolées l'une de l'autre par l'émail qui recouvre les fils. Les couches sont isolées entre elles par des bandes de papier paraffiné.

L'émail et le papier paraffiné peuvent se détériorer si le conducteur atteint une température excessive, causant ainsi des courts-circuits entre les spires

Pour éviter ceci, il faut utiliser des conducteurs d'une section appropriée au courant qui doit les parcourir, de façon à ne pas avoir des dissipations de puissance excessives et des augmentations de température dangereuses.

On détermine la section des conducteurs d'après la densité de courant maximale admissible, c'est-à-dire d'après le courant maximal qui peut traverser chaque millimètre carré de leur section

Dans la pratique, on mesure la densité du courant en ampères par millimètre carré (**A / mm²**).

Exemple : supposons que la densité du courant ne devait pas dépasser 5 **A** pour chaque millimètre carré de la section. Cela signifie que, si un enroulement doit être parcouru par un courant de 5 **A**, le conducteur qui le constitue doit avoir une section de 1 **mm²** ; si, au contraire, l'enroulement doit être parcouru par un courant de 10 **A**, le conducteur devra avoir une section de 2 **mm²**, de façon à ce que, sur chaque millimètre carré il n'y ait toujours que 5 **A**

!!!! Rappel : max : 5A/mm² d'après la réglementation

Charge d'un transfo

Donc, il faut veiller à ne pas relier à son secondaire une charge exigeant un courant supérieur au courant maximal que peut fournir l'enroulement, ceci afin de ne pas dépasser dans les conducteurs la densité maximale de courant admissible

Normalement, le constructeur du transformateur indique le courant de charge **et la puissance secondaire exprimée en général en voltampères (symbole VA)**, c'est-à-dire le **produit des volts par les ampères du secondaire**.

Comment distinguer le primaire du secondaire ?

Il existe deux moyens simples : avec un ohmmètre, et avec ses yeux. :

a) Avec un ohmmètre

Une simple mesure de la résistance ohmique des bobinages permet de faire la distinction : la résistance ohmique (en continu) du côté haute tension est plus grande (plus de spires) que celle du côté basse tension

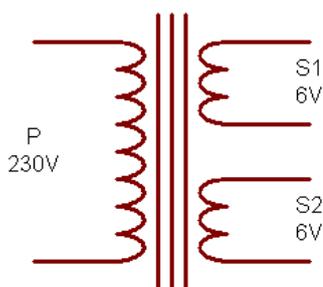
Exemple : Ainsi, pour un transfo abaisseur de tension, si vous mesurez d'un côté 35 ohms et de l'autre côté 180 ohms, l'enroulement qui fait 180 ohms est le primaire et l'enroulement qui fait 35 ohms est le secondaire.

b) Avec ses yeux

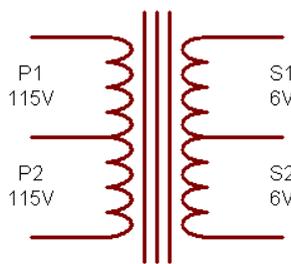
La section (le diamètre) du fil utilisé pour la haute tension est plus faible que la section du fil utilisé pour la basse tension

Remarque : plus la puissance du transformateur exprimée en VA est importante, et plus le transformateur est gros, et plus les fils ont un diamètre important.

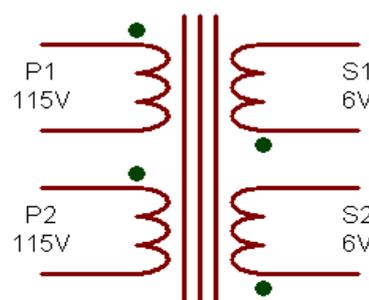
Transfo à prises intermédiaires



On voit ici deux enroulements séparés sont totalement isolés entre eux



Un point intermédiaire existe au primaire et au secondaire.



Le point noir indique le début de l'enroulement, les courants i_1 et i_2 entrent de manière à créer des flux qui s'additionnent. Ce sont des « **Bornes homologues** »

Comment reconnaître le sens des enroulements ?

Un mauvais câblage peut conduire à la création de champs magnétiques opposés au sein du composant, ce qui dans le meilleurs des cas conduit à obtenir une tension nulle. Dans le pire des cas (notamment pour les petits transfos avec des fils très fins), le composant surchauffe et grille.

Sur ce schéma de droite, le début de chaque enroulement est représenté par un point. Ce point (parfois une étoile) est parfois dessiné sur le transformateur lui-même, mais ce n'est malheureusement pas toujours le cas. Il est aussi à noter que ce point n'est pas toujours représenté dans les schémas électroniques faisant usage de transfo

Transformateur IDEAL (SANS pertes) monophasé

= Transformateur parfait

Parfait : il n'y a aucune perte ; le rendement est de 100%

- pas de puissances perdues dans les conducteurs (pas d'échauffement)
- pas de puissances perdues dans le noyau magnétique

Rapport de transformation :

1) nombre ampère tour primaire = nombre ampère tour secondaire

$$N_1 I_1 = N_2 I_2$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1}$$

2) Pour un transfo idéal, toute l'énergie au primaire se retrouve au secondaire

$$P_{\text{primaire}} = P_{\text{secondaire}}$$

$$U_1 I_1 = U_2 I_2$$

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{I_1}{I_2}$$

On définit **le rapport de transformation en MONOPHASE m** par :

$$m = \frac{U_2}{U_1} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{I_1}{I_2}$$

(Voir petite correction plus tard)

Si $m > 1$, le transformateur est élévateur de tension ;

Exemple : on élève la tension pour pouvoir la transporter par une ligne aérienne
Pourquoi élève-t-on la tension ? Réponse : diminue le courant donc les pertes par échauffement ($R I^2$)

Si $m < 1$, le transformateur est abaisseur de tension.

Exemple : alimentation de toutes sortes, transfo 220 V / 110 V

' $m = 1$ Transformateur d'isolement galvanique

- permet de faire l'isolation électrique entre le primaire et le secondaire
- s'utilise pour isoler les circuits. Il n'y a aucun contact électrique entre le circuit primaire et le circuit secondaire.

Remarques importantes :

Attention !!!!

Quand on élève la tension : → on abaisse de courant
Quand on abaisse la tension : → on élève de courant

DONC :

- L'enroulement à haute tension est bobiné avec un fil plus fin que l'enroulement basse tension
- L'enroulement basse tension est bobiné avec un fil de grosse section

Pour repérer le coté HT et le coté BT d'un transfo, on peut mesurer la résistance des enroulements

Exercices :

1) secteur 220 V quel est le rapport de transformation pour avoir 24 V AC ?

Réponse : $220/24 = 9,2/1$

2) soit un transfo 220 V AC, 340 t au primaire, 20 t au secondaire. Quel est la tension au secondaire ?

Réponse : - le rapport du transfo est de $20/340 = 1/17 \rightarrow 220 \cdot 1/17 = 13 \text{ V AC}$

Le transfo est réversible, le primaire peut devenir le secondaire, il peut être abaisseur ou élévateur de tension

Application : Transfo pour les petits courants (électronique) :

Dans le cas de l'électronique, ces pertes sont négligeables, on fait le calcul de la puissance et on prend arbitrairement une valeur supérieure pour être certain de son coup

Pour commander votre transfo, il faut spécifier la tension primaire et secondaire et la puissance ex 220 V / 12 V - 40 VA

Unité de puissance : VA (volt ampère), un transformateur réel ayant des pertes, il s'agit bien d'une puissance apparente

Transformateur REEL - AVEC pertes (monophasé) – Transformateurs industriels monophasé

Donc avec pertes !!! :

- Effet Joule (Résistance interne des enroulements)
- Courant de Foucault
- Hystérésis

Les pertes ne sont pas négligeables.

Rapport de transformation (en complément à ce qui s'est dit plus haut)

Le rapport de transformation se mesure à vide (pas de charge, $I_2=0$)

A vide car :

- le secondaire d'un transfo est un générateur
- la tension d'un générateur à vide = $fem E$ Voir cours de l'an passé

Rendement

Le rendement est le rapport entre l'énergie utile (W_u) (donc secondaire) et l'énergie absorbée (W_a). (primaire)

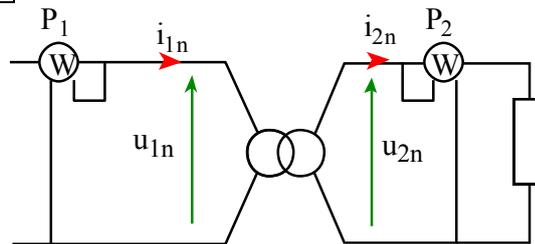
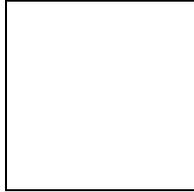
$$\eta = \frac{W_u}{W_a}$$

Pour les transformateurs construits autour d'un noyau en tôles de fer peuvent atteindre un rendement de 98 à 99 % voir même 99,9 %.

Calcul du rendement

Mesure directe

Cette méthode consiste à mesurer avec deux wattmètres P_1 et P_2 .



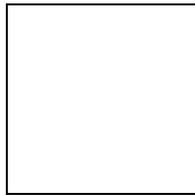
Mesure directe du rendement

Mesure du Rendement par la méthode des pertes séparées

$$\text{Rendement} = \frac{P_2}{P_1} = \frac{U_2 I_2 \cos \phi_2}{U_1 I_1 \cos \phi_1}$$

Or $P_1 = P_2 + \text{pertes}$

Pertes = puissances perdues



Donc pour connaître le rendement d'un transfo, il faut connaître

- La puissance fournie au secondaire
- Les pertes :
 - Les pertes fer
 - Les pertes cuivre

Cette méthode s'appelle la **méthode des pertes séparées**

La méthode des pertes séparées consiste à placer le transformateur dans les deux états l'un pour la mesure des pertes fer, l'autre essai pour la mesure des pertes cuivre.:

Elles ont également l'avantage de permettre la mesure du rendement *avec une consommation de puissance réduite, sans faire l'essai en fonctionnement réel*. Ceci est intéressant lorsqu'on réalise les tests d'un transformateur de forte puissance et que l'on ne dispose pas dans l'atelier de la puissance nécessaire pour l'alimenter à son régime

nominal.

Mis à part pour les plates-formes d'essai chez les constructeurs, cette méthode n'a donc pas grand intérêt pour uniquement connaître le rendement car, dans ce contexte, une mesure directe à puissance nominale (normale) est bien souvent suffisante.

Description des pertes de puissance d'un transformateur

Les pertes énergétiques ont deux origines :

Les pertes cuivre ou pertes par effet Joule

Les pertes par effet Joule dans les enroulements sont appelées également « pertes cuivre »,

Les "**pertes cuivre**" correspondent à la puissance dégagée par effet Joule (dégagement de chaleur) dans les circuits électriques des bobinages.

Elles dépendent de la **résistance de ces enroulements et de l'intensité du courant qui les traverse** voir détails cours de l'an passé

Elles sont proportionnelles **au carré** de l'intensité.

$$P_j = R_1 I_1^2 + R_2 I_2^2 :$$

→ **les pertes cuivre** se mesure par un **essai en court-circuit** avec une tension de 5 % de la valeur nominale (voir plus loin)

Les pertes fer ou magnétiques

Les "**pertes fer**" correspondent à la puissance dépensée dans le circuit magnétique. **Elles dépendent du flux de la fréquence**

- or la fréquence est invariable (la fréquence du secteur ne change pas) et
- le flux dépend de la tension d'alimentation primaire U_1 (or la tension primaire ne varie pas avec la charge qui est au secondaire)
→ **Donc les pertes fer sont constantes à vide comme en charge** pour une même tension aimantation et même fréquence. Un essai à vide est plus facile à réaliser qu'un essai sur pleine charge, on fera donc un essai à vide.

Les pertes fer sont comme proportionnelles **au carré de la tension d'alimentation.**,

Ces pertes ont deux origines physiques :

Les pertes par courants de Foucault.

Origine : Courants induits par des variations de flux (champ magnétique variable) dans les masses métalliques) voir détails cours de l'an passé

Remèdes : Elles sont minimisées en **feuilletant le noyau** par l'utilisation de tôles magnétiques vernies, donc isolées électriquement les unes des autres pour constituer le circuit magnétique, ce en opposition à un circuit massif.

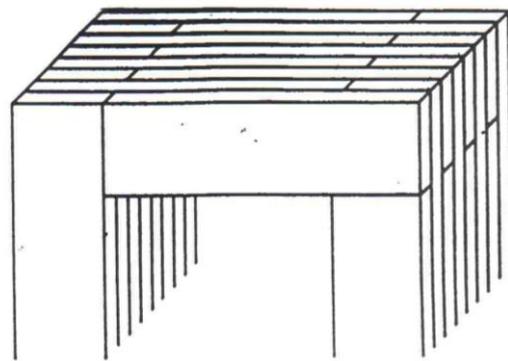


FIG. 8.15. — L'enchevêtrement des tôles.

Les pertes par hystérésis,

Origine : Pertes dues à l'échauffement. Cet échauffement est dû à la modification de l'orientation des particules au sein du métal soumis à un champ magnétique variable) voir détails cours de l'an passé

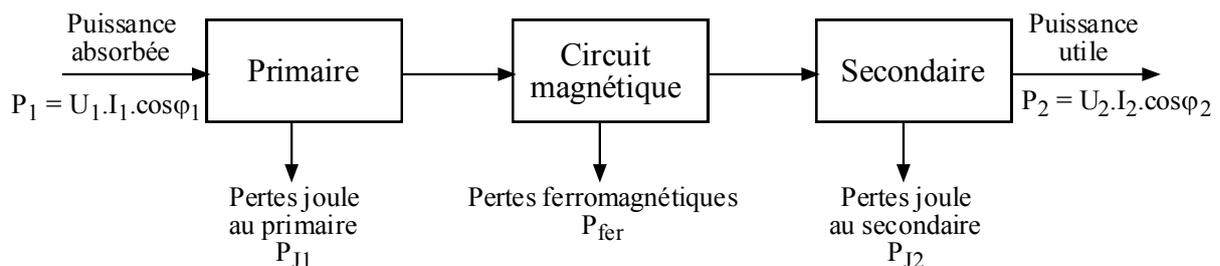
Elles sont proportionnelles à la fréquence et de l'aimantation

Remèdes : elles peuvent être minimisées par l'utilisation d'un matériau ferromagnétique doux.

→ La mesure des pertes fer se fait par un *essai se fait par un **essai à vide*** (plus facile à réaliser qu'en charge)

Divers : Le transfo à vide a un très mauvais cos phi, il doit être débrancher et doit car il diminue les Le cos phi de l'installation»

Bilan énergétique



Les pertes fer sont dues à l'hystérésis du matériau ferromagnétique et aux courants de Foucault.

Les pertes d'un transformateur

Les pertes d'un transformateur se composent des pertes à vide et des pertes en charge.

Les pertes à vide (ou pertes "fer") se produisent au sein du noyau ferromagnétique. Elles sont constantes quel que soit le régime de charge du transformateur, c'est-à-dire quelle que soit la consommation du bâtiment qui y est raccordé.

Les pertes en charge (ou pertes "en court-circuit" ou pertes "cuivre") sont, elles, dues à l'effet Joule (perte par échauffement des fils ou feuillards parcourus par un courant), augmentées des pertes additionnelles (pertes supplémentaires occasionnées par les courants parasites dans les enroulements et pièces de construction). Elles varient avec le carré du courant ou de la puissance débitée (si la tension reste constante).

Remarque : la dénomination "pertes cuivre" date de l'époque où tous les enroulements étaient réalisés en cuivre. C'est encore le cas pour les très petites puissances. Pour les autres transformateurs, les constructeurs se sont tournés vers l'aluminium. C'est pourquoi, on parle maintenant de "pertes en court-circuit".

On exprime donc les pertes totales d'un transformateur par

$$W = W_{fe} + W_{cu} \times (S/S_n)^2$$

W = pertes totales du transformateur en charge réelle [W]

W_{fe} = pertes fer (constantes) [W]

W_{cu} = pertes en court-circuit à la charge nominale [W]

S_n = puissance nominale du transformateur [VA]

S = charge appliquée aux bornes [VA]

Exemple.

Soit un transformateur de 500 kVA, ayant des pertes fer de 730 W et des pertes en court-circuit à pleine charge de 4 550 W.

Sous un $\cos\phi$ de 0,9, et une charge du transformateur de 300 kW, les pertes totales sont :

$$W = 730 \text{ [W]} + 4\,550 \text{ [W]} \times ((300 \text{ [kW]} / 0,9) / 500 \text{ [kVA]})^2 = 2\,752 \text{ [W]}$$

Soit un rendement de $300 - 2,752 / 300 = 99\%$

A titre de premier exemple regardons l'évolution des pertes fer, et cuivre d'un transformateur HT/BT de 250kVA dont le diélectrique est de l'huile.

Année de construction	Pertes dans le fer		Pertes à pleine charge dans le cuivre		Pertes totales à pleine charge	
	Watts	%	Watts	%	Watts	%
1935	1570	100	4630	100	6200	100
1951	1380	88	4200	93	5630	91
1958	750	48	4010	87	4760	77
1991	650	42	3250	70	3850	62
2003	650	42	3250	70	3850	62

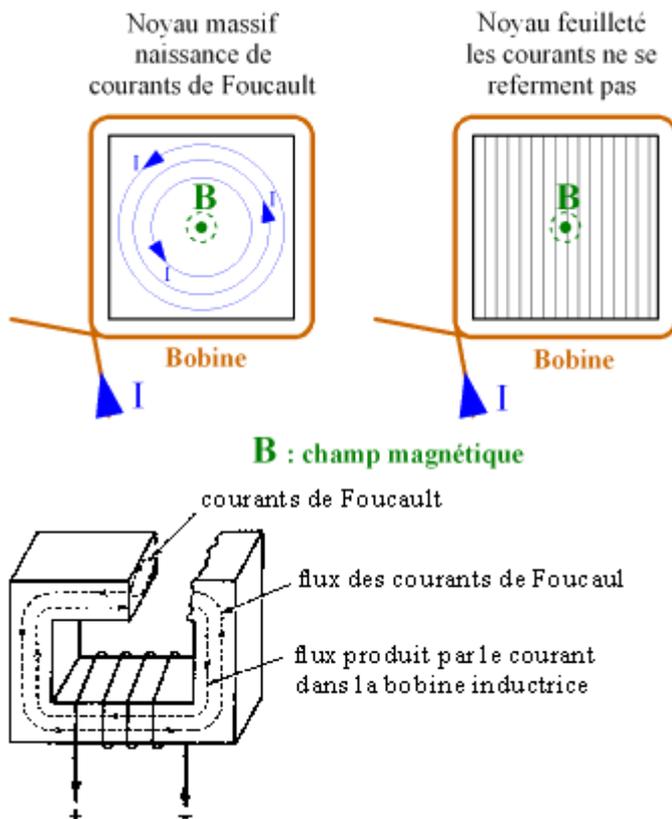
A titre de deuxième exemple, voici les pertes de transformateur BTA/BTA triphasés commercialisés par BC Transfo

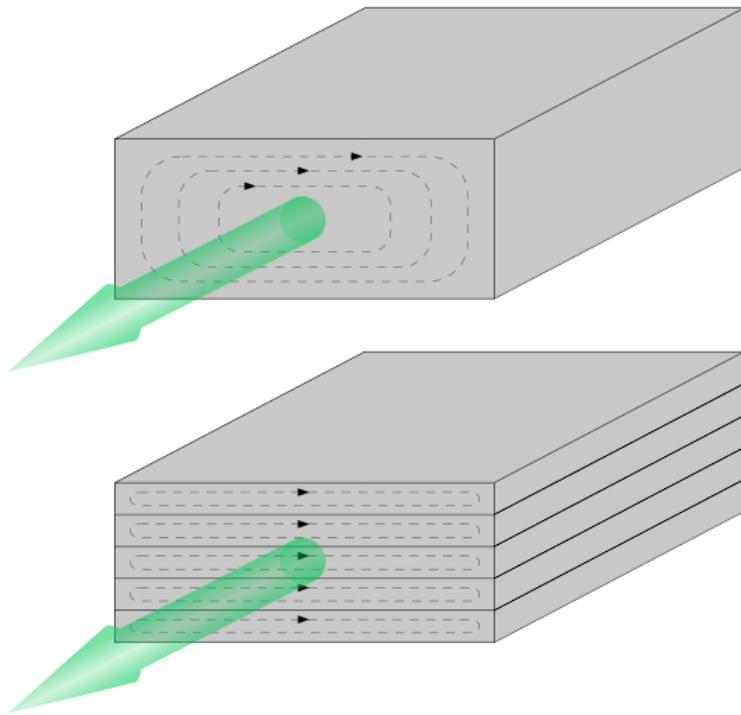
Puissance (kVA)	Pertes		
	fer (W)	cuivre (W)	totales (W)
0,4	8	50	58
0,8	15	70	85
1,25	25	95	120
2	30	120	150
2,5	30	130	160
15	170	840	1010

Ces tableaux sont significatifs de ce qui a été dit précédemment, les pertes n'évoluent pas proportionnellement à la puissance. Ceci explique en particulier que l'échauffement des petits transformateurs est plus important que les gros transformateurs.

Le champ magnétique variable au cours du temps est responsable de l'apparition d'une force électromotrice à l'intérieur du milieu conducteur. Cette force électromotrice induit des courants dans la masse. Ces courants ont deux effets :

- un échauffement par effet Joule de la masse conductrice ;
- un champ magnétique qui s'oppose à la cause de la variation du champ extérieur (loi de Lenz).



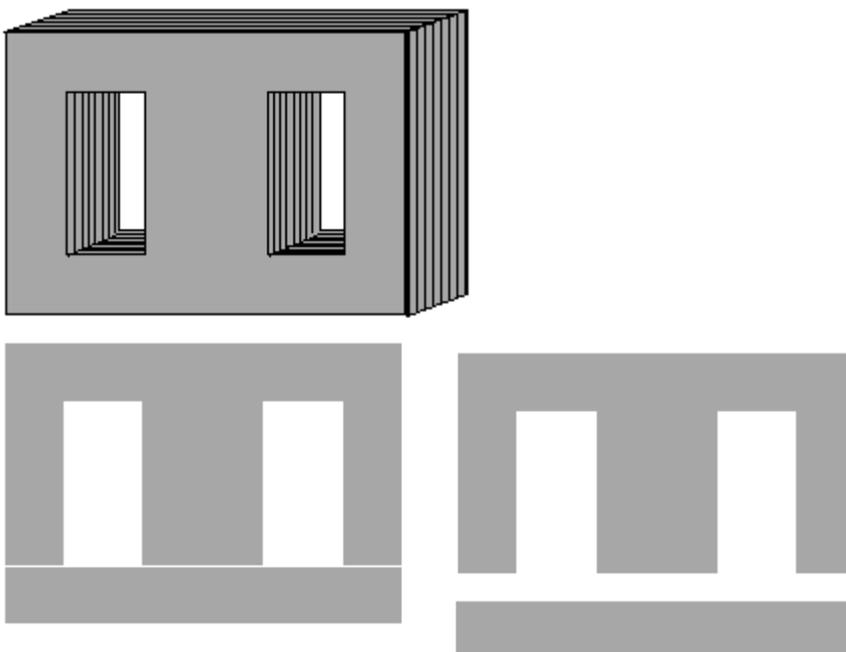


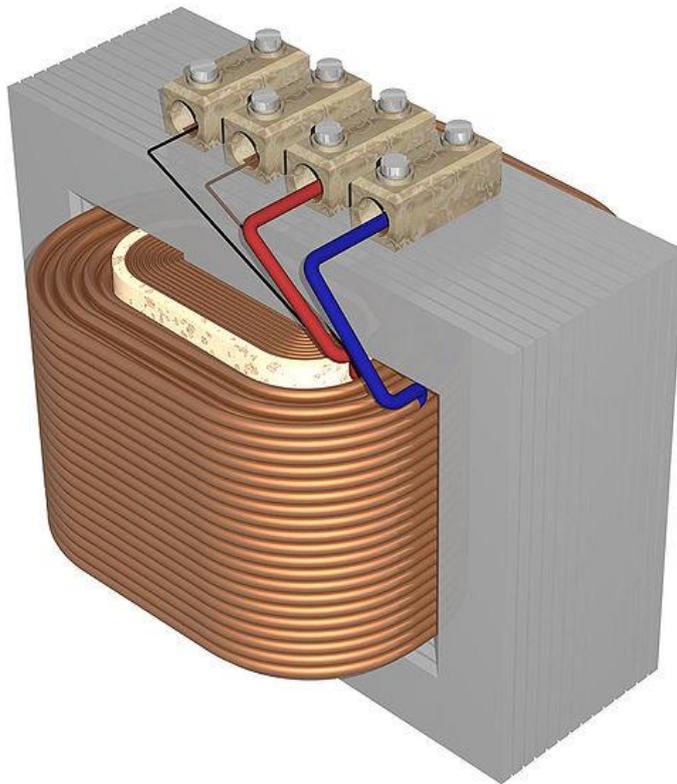
La puissance perdue par unité de volume du fait des courants de Foucault dans un matériau de **résistivité** ρ , d'épaisseur e et soumis perpendiculairement à un champ magnétique d'amplitude B_{\max} variant sinusoïdalement au cours du temps avec une **fréquence** f est donnée par la relation suivante :

$$P = \frac{\pi^2}{6} \cdot \frac{e^2 B_{\max}^2 f^2}{\rho},$$

Construction:

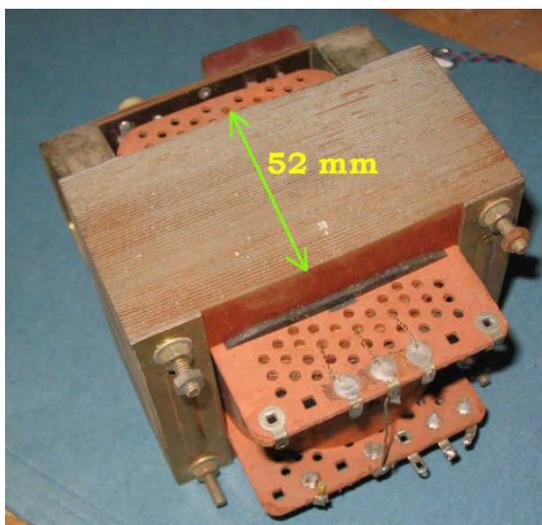
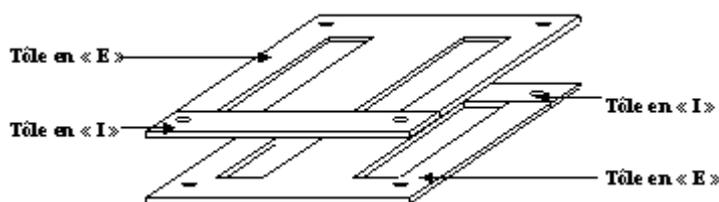
Feuilles de fer au silicium isolée par de la résine



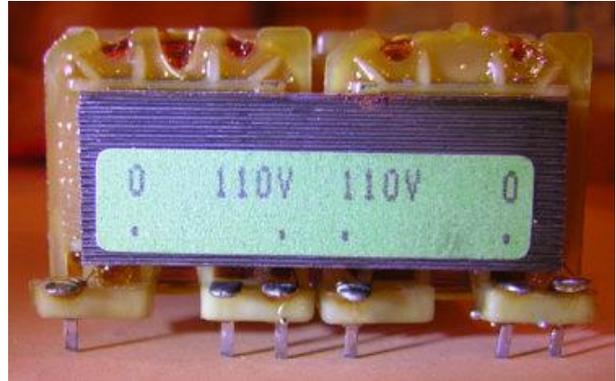
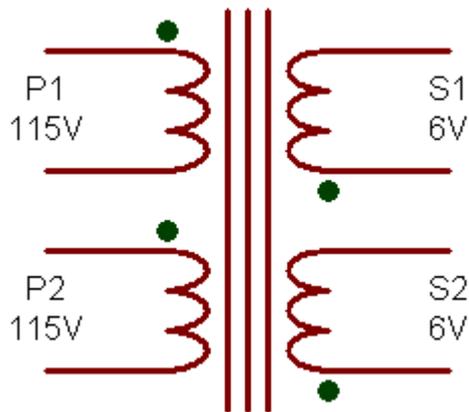


Réalisation du circuit magnétique par empilement de tôles

Les tôles ont une épaisseur entre 0,4 et 0,7 mm en fonction du soin qui est exigé par l'application. L'empilement de plan des tôles en " E " et en " I " avec alternance des joints entre le " E " et le " I " permet de fabriquer le circuit magnétique. L'ensemble forme un bloc cohérent quand cet ensemble est collé ou par serrage grâce à des rivets ou un système vis écrous qui prennent place dans les trous. Les plans de tôle sont isolés entre eux par l'oxydation naturelle des tôles ou par un vernis. Ainsi les pertes par courant de Foucault sont limitées.



Repérage des bobines



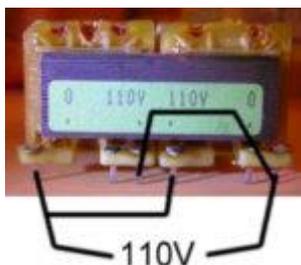
Sur ce schéma de gauche, le début de chaque enroulement est représenté par un point.

Sur la photo de droite, rien n'indique le sens des enroulements. Cependant, dans la très grande majorité des cas, le sens des enroulements est le même pour chaque enroulement de la section primaire, et le même pour chaque enroulement de la section secondaire. Il suffit de se dire que les deux enroulements sont identiques et disposés côte à côte. Dans l'exemple ci-contre, il y a deux enroulements primaires de 110V, chacun occupe 2 broches de raccordement (la photo laisse apparaître 6 broches, mais seules quatre sont réellement raccordées). Ainsi, la première broche correspond au début de l'enroulement primaire N°1, la seconde broche correspond à la fin de l'enroulement primaire N°1, la troisième broche correspond au début de l'enroulement primaire N°2, et la quatrième broche correspond à la fin de l'enroulement primaire N°2.

Câblage des primaires

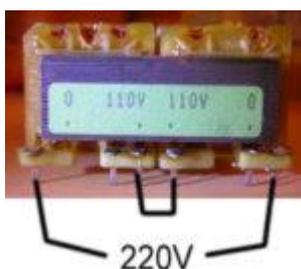
Primaires - Câblage en parallèle

Cette configuration de câblage est typique de ce que l'on doit réaliser pour le raccord à un réseau 115V. Notez sur la photo de gauche la façon dont sont reliés les deux primaires : leur mise en parallèle ne doit pas se faire n'importe comment, les enroulements doivent être dans le même sens pour que le fonctionnement soit normal. Voir aussi Comment reconnaître le sens des enroulements ?



Primaires - Câblage en série

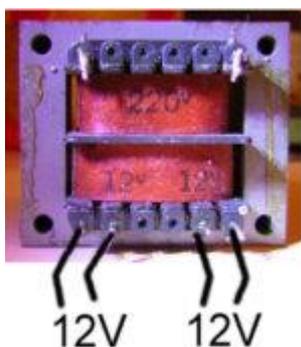
Cette configuration de câblage est typique de ce que l'on doit réaliser pour le raccord à un réseau 230V. Comme pour la mise en parallèle des primaires, le raccordement des broches de chaque enroulement à son importance, il faut là aussi respecter le sens de leur enroulement.



Câblage des secondaires

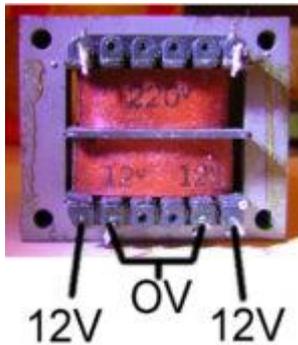
Secondaires - Câblage isolé

Le câblage isolé permet de disposer de deux sources de tension totalement indépendantes, qui pourront par la suite être combinées selon les besoins. On peut par exemple utiliser cette configuration de câblage pour réaliser deux alimentations continues totalement indépendantes (2 x 12Vcc par exemple) dont les sorties pourront être combinées en série ou en parallèle.



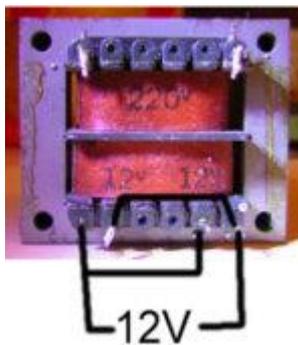
Secondaires - Câblage en série avec point milieu

Ce type de câblage permet de disposer de deux tensions identiques en valeur mais opposées en phase, et est classiquement utilisé pour la réalisation d'alimentations continues symétriques. Dans cette configuration, on ne gagne rien ni en tension, ni en courant. Les deux sources de tensions ne sont pas isolées, tous les câblages ne seront pas permis.



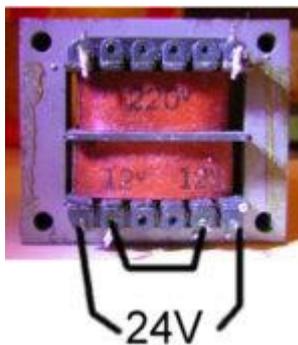
Secondaires - Câblage en parallèle

Le câblage en parallèle de secondaires permet d'additionner les courants disponibles en sortie du transfo, en conservant la même tension de sortie. Par exemple, si l'on dispose de deux secondaires de 12V / 1A chacun, on obtient en les combinant en parallèle, un secondaire unique équivalent de 12V / 2A. Remarque : les deux enroulements secondaires ne sont jamais parfaitement identiques. Quand ils sont trop différents (ce qui n'est heureusement pas trop souvent le cas), un enroulement peut fournir du courant à l'autre, ce qui provoque des pertes inutiles.



Secondaires - Câblage en série

Le câblage en série de secondaires permet d'additionner la tension disponible en sortie du transfo, en conservant le même courant maximal de sortie. Par exemple, si l'on dispose de deux secondaires de 12V / 1A chacun, on obtient en les combinant en série, un secondaire unique équivalent de 24V / 1A.



Comment distinguer le primaire du secondaire?

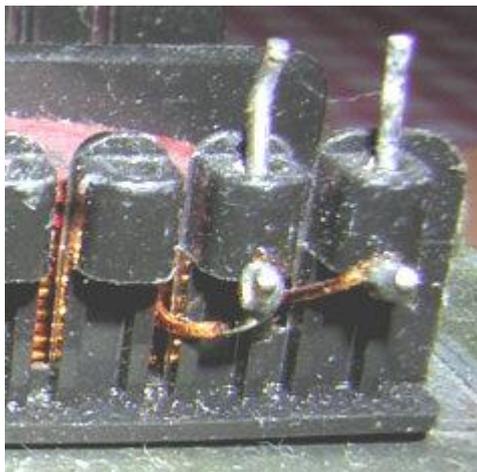
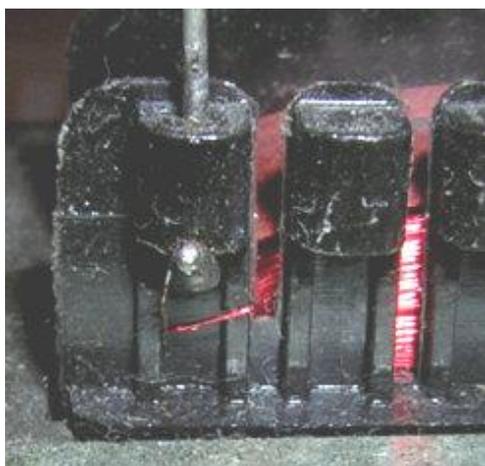
Il existe deux moyens simples : avec un ohmètre, et avec ses yeux.

Avec un ohmètre

Partons de l'hypothèse que le transformateur en question est un transformateur d'alimentation, abaisseur de tension. Dans ce cas, l'impédance du primaire est plus importante que celle du secondaire. Une simple mesure de la résistance ohmique des bobinages permet donc de faire la distinction : la résistance ohmique (en continu) du primaire est plus grande que celle du secondaire. Ainsi, si vous mesurez d'un côté 35 ohms et de l'autre côté 180 ohms, l'enroulement qui fait 180 ohms est le primaire et l'enroulement qui fait 35 ohms est le secondaire. Remarque : plus la puissance du transformateur (exprimé en Watts ou en VA) est importante, et plus le transformateur est gros, et plus les fils ont un diamètre important.

Avec ses yeux

Restons-en avec l'hypothèse que le transformateur en question est un transformateur d'alimentation, abaisseur de tension. Dans ce cas, la section (le diamètre) du fil utilisé pour le primaire est plus faible que la section du fil utilisé pour le secondaire. Sur les gros plans des contacts de transfo ci-dessous, on voit nettement la différence (primaire en haut en fil fin, et secondaire en bas, en fil plus gros).



Les essais.– Mesures des pertes

Les essais

En charge

On met au secondaire une charge

A vide

Les bornes du secondaire sont en l'air.
Pas de charge

En court circuit

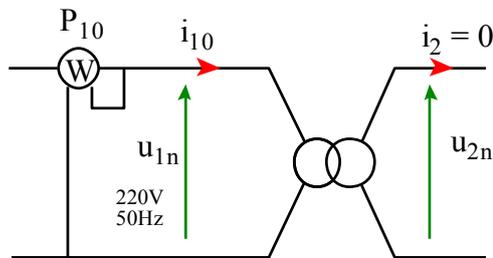
Les bornes du secondaire sont pontées ensemble, en court circuit

Justification des essais

Pour évaluer séparément chacun de ces termes il faut **minimiser** l'autre :

Dans l'*essai à vide*

Remarque : l'indice 0 (zéro) indique qu'il s'agit de valeurs à vide.



Bilan des puissances : $P_{10} = (P_{J10} + P_{J2}) + P_{fer}$.

- Le courant au secondaire est nulle (car à vide, le circuit secondaire est ouvert) $I_2 = 0 \Rightarrow P_2 = 0$
 - pas d'effet joule au secondaire = 0
- Le courant au primaire I_{10} est très faible. Il correspond au :
 - courant nécessaire à la création du flux. C'est le courant magnétisant
 - courant nécessaire à l'effet joule du primaire $R_1 I_{10}^2$ mais le courant primaire est négligeable (l'impédance d'entrée du primaire du transformateur est très grande et le courant dans le primaire est réduit) = PRESQUE 0

→ Seul intervient les pertes fer, les pertes cuivre sont négligeables

Un wattmètre branché, dans l'essai à vide, sous tension nominale, sur le primaire renseigne la puissance perdue par les pertes fer

Pour l'*essai en court-circuit*

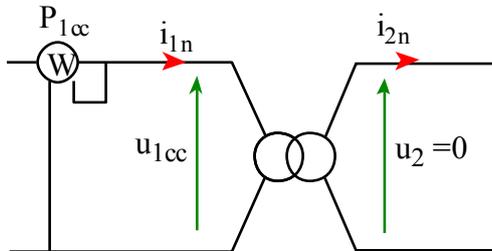
Convention : L'indice $_{cc}$ indique qu'il s'agit de valeurs mesurées en court-circuit.

Tension en court circuit c'est la tension primaire qu'il faut donner au transfo pour que dans le secondaire circule un courant nominal dans l'essai en court circuit

Si on exprime la tension de court circuit en % de la tension nominale, alors on applique la formule ci-dessous

$$x = 100 \frac{U_{1cc}}{U_{1n}}$$

x est le pourcentage
 U_{1n} étant la tension primaire nominale,
 U_{1cc} = tension en court circuit



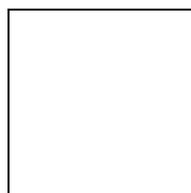
On court circuite le secondaire à l'aide d'un fil de grosse section et on place un ampère mètre au secondaire

On applique progressivement la tension primaire à l'aide d'un rhéostat en tenant à l'œil l'ampèremètre secondaire. Lorsque le courant secondaire correspond au courant nominal. Ceci se passe pour +/- 5% de la tension nominal primaire.

Bilan des puissances : $P_{1cc} = P_{J1cc} + P_{J2cc} + (P_{fer.})$

- le courant primaire et secondaire est maximum
 - Les pertes cuivre $P_{J1cc} + P_{J2cc}$ sont maximum
- la tension primaire reste faible (+/- 5% de la tension primaire).
 - Les pertes fer sont fonction de la tension primaire (voir plus haut) et comme la tension primaire est réduite, les pertes fer sont minimales

→ Les pertes cuivre sont prépondérantes (RI^2)



Enfin : **essai en court-circuit**

La lecture sur le wattmètre branché au primaire, dans un essai en court circuit, sous les courants primaire et secondaire nominaux est considérée comme étant la valeur des pertes cuivre du transformateur.

Remarques

Remarque 1:

Les pertes fer sont constantes

Les pertes cuivre varient avec le carré du courant de la charge

Remarque 2 :

Si on appliquait la tension nominale au primaire lors d'un essai en court-circuit, les deux enroulements seraient traversés par des courants énormes (**25 x plus important**)

Remarque 3 :

Le rendement varie avec le $\cos\phi$ de la charge

$$\text{Rendement} = \frac{P_2}{P_1} = \frac{U_2 I_2 \cos\phi_2}{U_1 I_1 \cos\phi_1}$$

$$\frac{U_2 I_2 \cos\phi_2}{U_2 I_2 \cos\phi_2 + \text{pertes}}$$

$$= \frac{U_2 I_2}{U_2 I_2 + \frac{\text{pertes}}{\cos\phi_2}} \quad \text{En divisant le haut et le bas par } \cos\phi$$

La valeur du rendement s'améliore avec le $\cos\phi$ du secondaire !!!

Remarques 4 :

on démontre que : **le rendement passe par un maximum, quand les pertes fer = pertes cuivre, Cela se passe au environ des 2/3 de la charge**

Lecture de la plaque signalétique

Les indications de la plaque signalétique sont les tensions et courants nominaux donc quand le transfo fonctionne avec une charge

Exemple : 5000 V / 235 V ; 50 Hz ; 8 kVA

Ce qui donne :

$V_{1n} = 5000$ V tension nominale du primaire

$V_{20} = 235$ V tension à vide du secondaire. \rightarrow

$$m = \frac{V_{20}}{V_1}$$

$f = 50$ Hz fréquence nominale de fonctionnement.

$S_{1n} = 8$ kVA puissance apparente nominale au

primaire $S_N = V_{1N} I_{1N} = V_{20} I_{2N} \rightarrow I_{1N} = \frac{S_N}{V_{1N}}$ et

$$I_{2N} = \frac{S_N}{V_{20}}$$

Autotransformateur

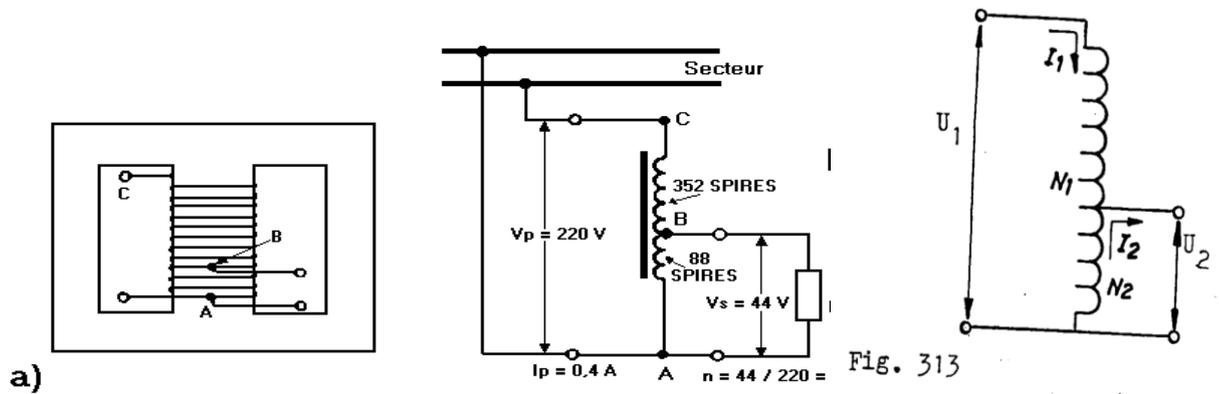


Fig. 9. - Autotransformateur abaisseur de tension.

Description :

L'auto transfo est constitué d'un seul enroulement muni d'une prise intermédiaire indiquée par **B** et d'une seconde prise reliée à l'extrémité **A**.

L'autotransformateur peut être soit un élévateur, soit un abaisseur de tension

Fonctionnement

Certaines spires servent au primaire et au secondaire. Elles sont donc parcourues par le courant primaire et le courant secondaire.

Ces deux courants I_1 et I_2 provoquent deux flux d'induction égaux et opposés ; pour cela, les courants doivent circuler en sens contraire, c'est-à-dire que

- l'un est dirigé, par exemple, de la prise intermédiaire **B** vers l'extrémité **A**
- , l'autre est dirigé de l'extrémité **A** vers la prise **B** et vice versa.

Dans la partie commune (enroulement comprise entre la prise B et l'extrémité A),

Le courant qui traverse la partie commune est égal à la différence entre les courants primaire et secondaire et a donc une intensité réduite.

Dans la partie commune, la section du fil peut être plus petite que le reste de l'enroulement (le courant est plus faible)

Avantages de l'auto transfo par rapport au transfo classique:

Un auto transfo (pas de second noyau) est:

- de volume moins encombrant, (une bobine au lieu de deux)
- moins lourd
- moins coûteux
- moins gourmand en cuivre (pas de second enroulement)
- plus économique en fer (noyau moins important)

- d'un rendement meilleur car moins de pertes fer et cuivre

qu'un transformateur à bobines séparées de puissance égale

Désavantages par rapport au transformateur

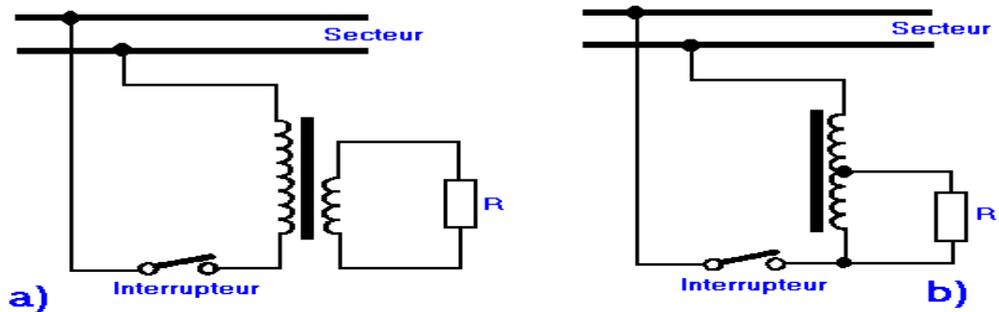


Fig. 11. - Transformateur et autotransformateur à primaire ouvert.

Dans le transfo à bobines séparés (fig 11- a), le circuit secondaire du transformateur n'est pas relié au secteur ; il n'est donc pas sous tension quand l'interrupteur est ouvert

Dans l'autotransformateur (fig 11-b) le circuit secondaire est relié au secteur par l'intermédiaire de l'enroulement ; quand on ouvre l'interrupteur, le circuit reste relié à l'un des conducteurs du secteur et se trouve donc sous tension.

Danger :

- 1) **Le primaire et le secondaire ne sont plus isolés électriquement**
- 2) Quand l'autotransformateur alimente un appareil, tous ces circuits sont montés sur un châssis métallique auquel est reliée généralement une extrémité de l'autotransformateur.

Le châssis est donc sous tension et, si on le touche, on peut recevoir une secousse électrique même quand l'appareil est éteint. Dans ce cas, pour éviter de recevoir des secousses désagréables, on doit débrancher la prise du secteur avant de toucher le châssis.

- 3) **en cas de coupure de la partie commune, la HT est reportée sur la BT. Expliquez pourquoi ?**

6.1 Utilisation

Son emploi est Interdit pour les circuits de sécurité à 24 V Pourquoi ?
Ils sont utilisés pour le démarrage de moteur asynchrone sous tension réduite.

Documents de référence :

Document fort bien documenté :

http://www.premiumorange.com/daniel.robert9/Transformateurs_et_autotransformateurs.html

Document en 6 pages : http://www.physique-appliquee.net/physique/transformateur/transformateur_leger.doc

Encyclopédie : http://fr.wikipedia.org/wiki/Transformateur_%C3%A9lectrique

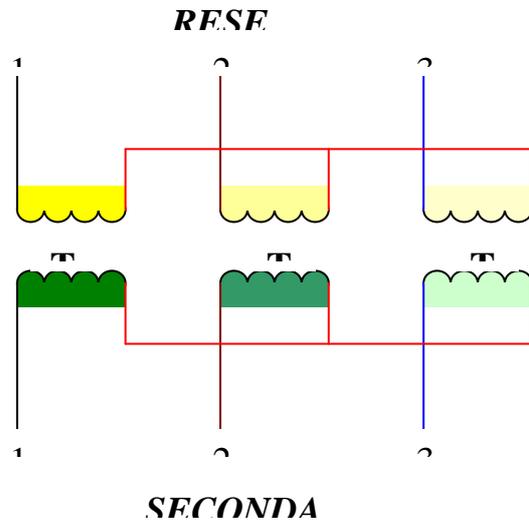
Cours en pdf : <http://fisik.free.fr/?choix=transfo>

TRANSFORMATEUR TRIPHASE

Transfo pour le triphasé

a) Trois transfo monophasé

On peut utiliser trois transformateurs monophasés identiques pour transformer une telle énergie. On adopte cette solution pour les très hautes tensions (100 Kv).



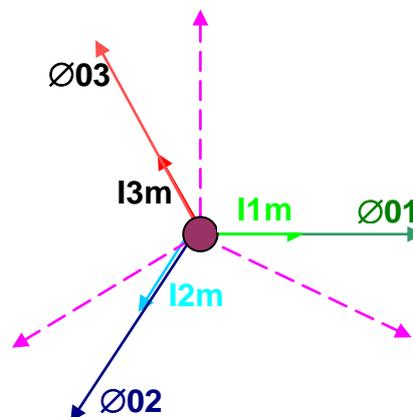
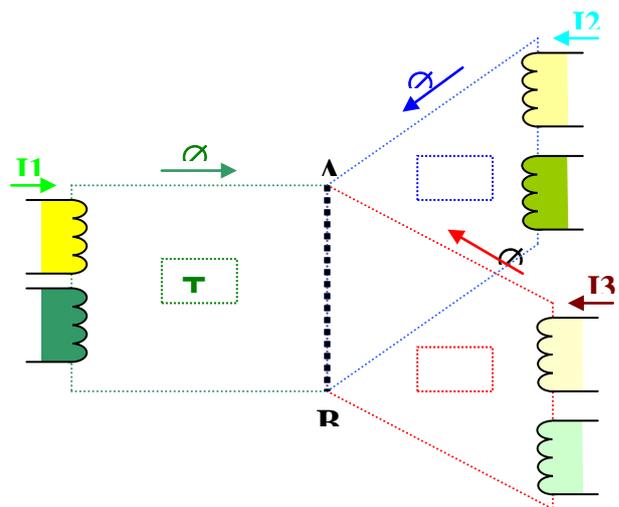
Considérons trois transformateurs monophasés identiques. Les secondaires étant ouverts, alimentons les trois bobines primaires par des tensions triphasées U_1, U_2, U_3 ; les bobines primaires sont alors parcourues par des courants triphasés I_{1m}, I_{2m} et I_{3m} , respectivement déphasé de 90° sur U_1, U_2 et U_3 .

Ces courants engendrent des flux $\varnothing_{01}, \varnothing_{02}$ et \varnothing_{03} en phase avec eux.

On fait la somme vectorielle de ces flux passants dans le **noyau central A B**

$$\varnothing_t = \varnothing_{01} + \varnothing_{02} + \varnothing_{03} = 0$$

comme ils sont décalés entre eux de 120° , la somme est nulle.



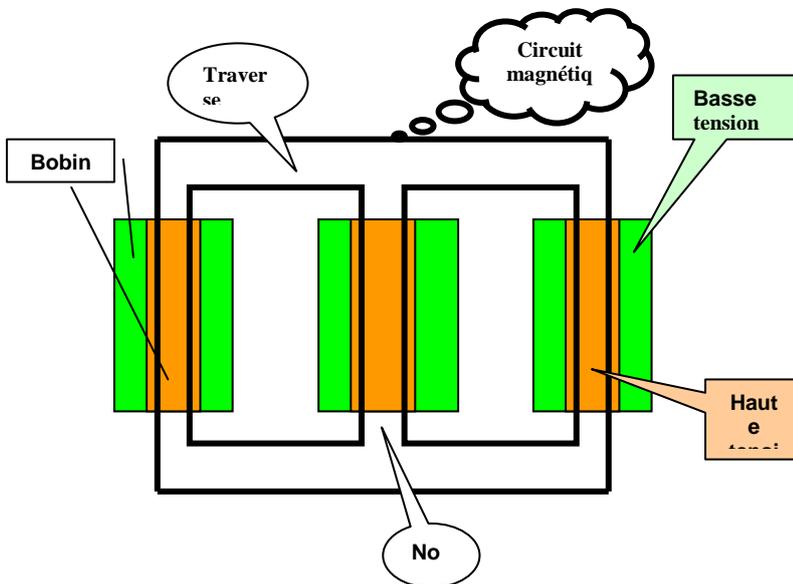
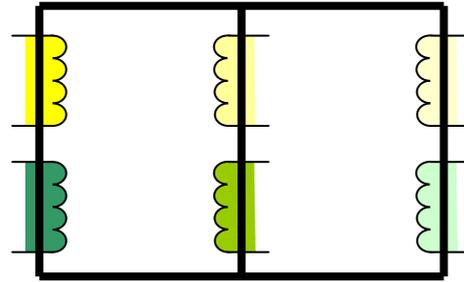
b) un transfo triphasé (suite du raisonnement précédent)

On préfère remplacer les trois transformateurs monophasés par un seul appareil à trois noyaux :
« **c'est le transformateur triphasé** »

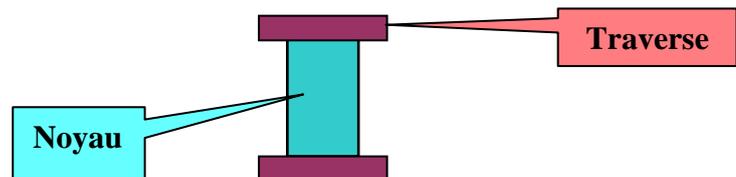
S'il n'y a pas flux dans le noyau central nous pouvons éliminer le **noyau AB**.

Le transformateur est assez encombrant, en pratique, pour le réduire, on raccourcit les traverses d'un des trois transformateurs monophasés pour en arriver à les supprimer complètement.

On obtient donc le transformateur triphasé ci contre :



Vue de profil



Remarque très importante

Chaque colonne représente un transformateur ayant n_1 spires au primaire et n_2 spires au secondaire.

DONC un transformateur triphasé = l'assemblage de trois transformateurs monophasés

En conséquence, **TOUT CE QUI A ÉTÉ DIT AU SUJET DU TRANSFORMATEUR MONOPHASÉ S'APPLIQUE À CHACUNE DES PHASES DU TRANSFORMATEUR TRIPHASÉ.**

Rôle des transformateurs dans la distribution de l'énergie électrique

Dans les centrales,

- On produit l'énergie électrique en moyenne tension (de 15 kV à 20 kV).
- On augmente la tension à l'aide d'un transfo jusqu'à 400 kV pour le transport dans les fils de ligne aérienne.
- Si on augmente la tension, le courant diminue dans le même rapport (propriétés du transfo). Et donc les pertes joules RI^2 diminuent.
- Du côté de réseau de distribution vers les particuliers, on diminue la tension à l'aide d'un autre transfo abaisseur de tension

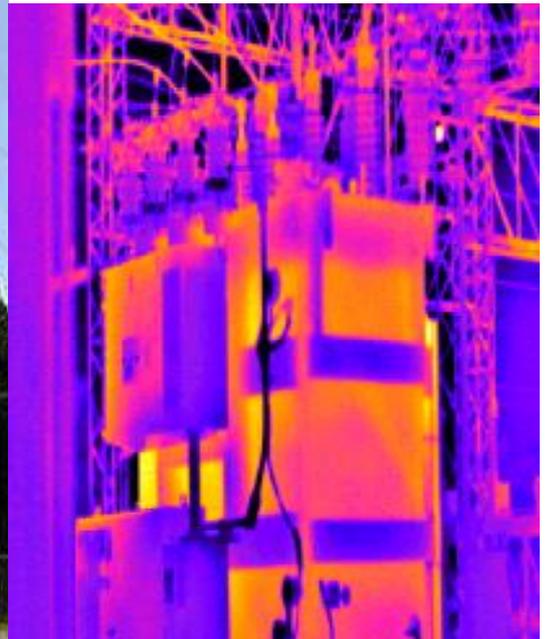


photo en thermographie

Mode de connexion

L'association des enroulements ou fractions d'enroulements, tant au primaire qu'au secondaire, se prête à un certain nombre de combinaisons (modes de connexion des enroulements).

Nous examinerons successivement les groupements

en étoile,

en triangle et

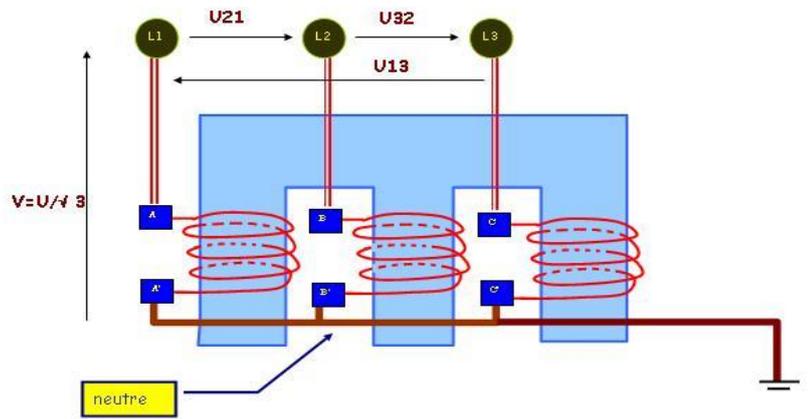
en zigzag, (ceux-ci s'appliquant tant au primaire qu'au secondaire du transformateur.)

Les diagrammes ci-après traduisent les relations de grandeur et de déphasage angulaire entre les tensions simples et composées, les courants de phase et de ligne.

LE CONNEXION ETOILE : Y

Dans ce groupement :

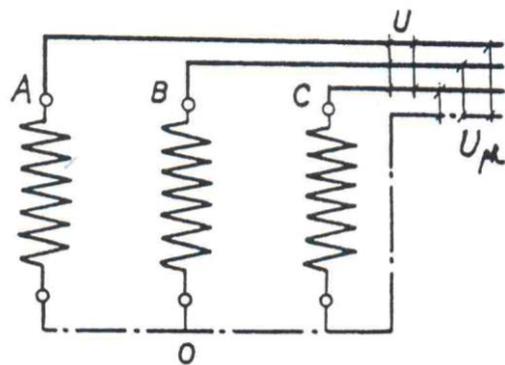
- les extrémités correspondantes (entrées ou sortie) des trois enroulements sont réunies entre elles en un point appelé neutre. Lequel pourra être accessible ou non),
- les extrémités restées libres sont réunies aux fils de la ligne.



Ce couplage permet d'obtenir :

deux tensions dans le rapport racine de trois suivant que l'on utilise le neutre ou pas.

Il supporte d'autre part le déséquilibre des charges avec le neutre utilisé



Constatations

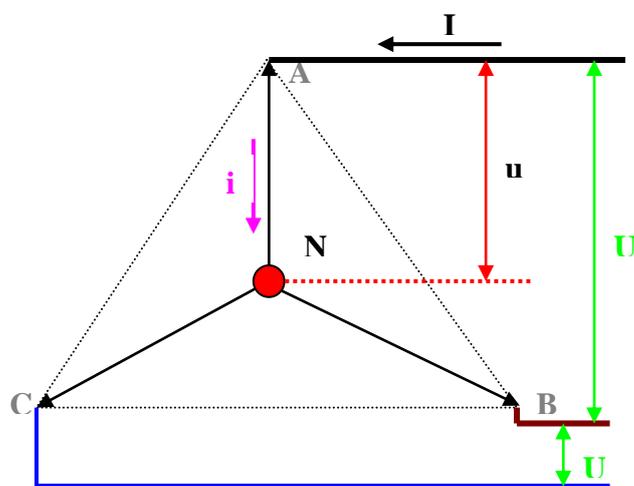
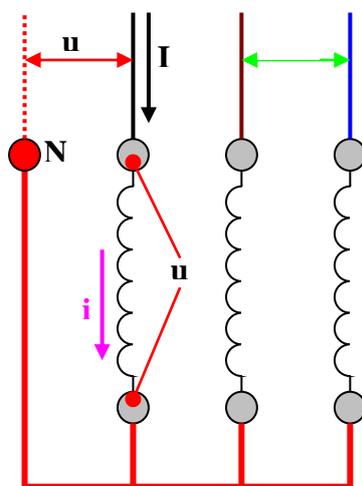
Nous voyons que dans le cas du couplage étoile :

- La tension par enroulement est :

$$u = \frac{U}{\sqrt{3}}$$

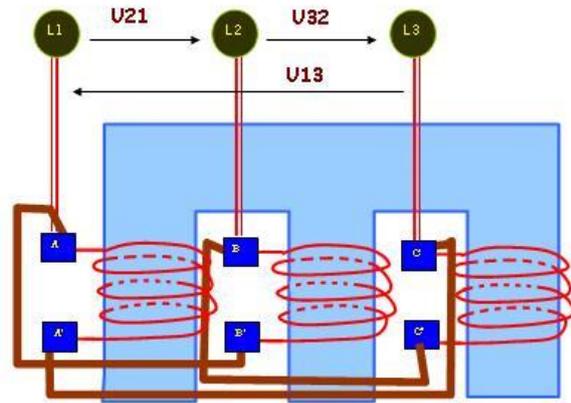
- Le courant dans l'enroulement est :

$$i = I$$



LE CONNEXION TRIANGLE : D

Une seule tension et nécessite *plus de spires* par colonne pour une même tension de ligne.



Constatations

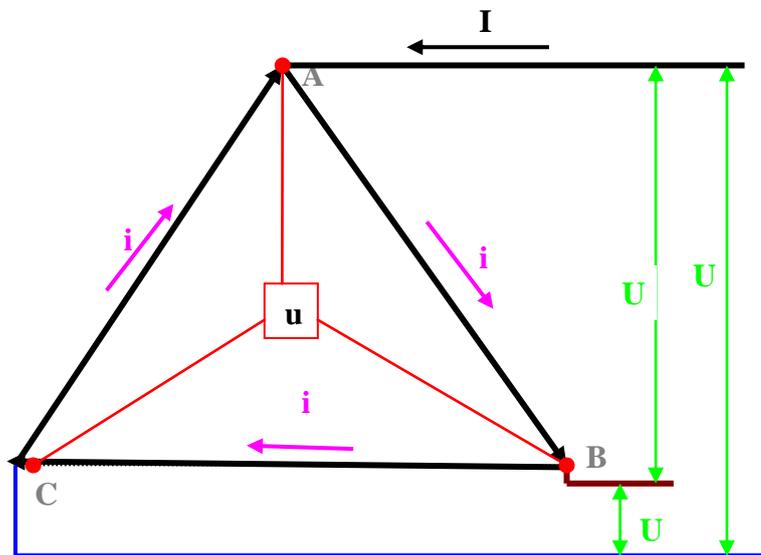
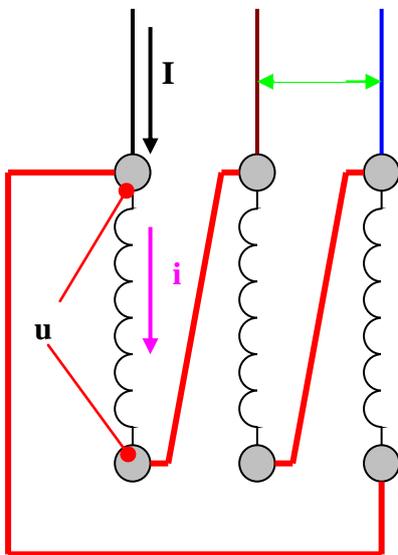
Nous voyons que dans le cas du couplage triangle :

- Le courant dans l'enroulement est :

$$i = \frac{I}{\sqrt{3}}$$

- La tension par enroulement est

: $u = U$



LE CONNEXION ZIGZAG : Z

Il est composé de :

- deux demi-enroulements bobinés dans le même sens
- placés sur des colonnes différentes.
- connectés en sens inverse

Avantages :

- présente les avantages du couplage étoile (point neutre disponible)
- meilleure répartition de la charge entre les colonnes en régime déséquilibré
- exige 1,16 fois plus de spires que le couplage étoile ou chute de tension de 13,5 % inférieure à celle qui serait obtenue si le secondaire tait monté en étoile.

Constatations

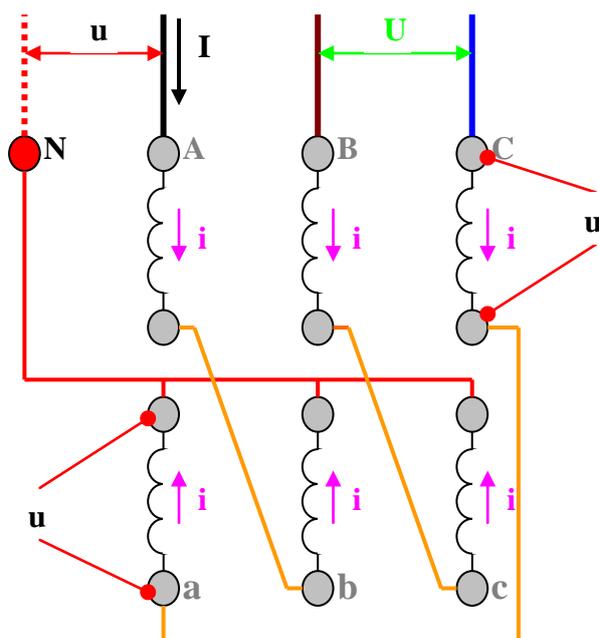
Ce groupement est un cas particulier du groupement en étoile, où chacune des branches est constituée par deux demi-enroulements portés par des noyaux différents
Nous voyons que dans le cas du couplage Zig-Zag :

Le courant dans l'enroulement est :

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

La tension par enroulement est :

$$u = U / \sqrt{3}$$



Référence :

http://prof.guedon.org/article.php3?id_article=145

Les différents rapports de transformation

En monophasé :

m_v (rapport de transformation du transformateur monophasé à vide)

Voir chapitre transfo monophasé

En triphasé, on distingue :

1) Rapport du NOMBRE DE SPIRES: $m_v = \frac{N_2}{N_1}$ avec N = nombres de spires

2) Rapport des TENSIONS DE PHASES $m_v = \frac{V_2(\text{phase})}{V_1(\text{phase})}$

Il n'en est pas de même du rapport de transformation global ou triphasé.

3) Rapport de transformation GLOBAL (ou TRIPHASE)

<p>Il est égal au rapport de la tension U_1 entre deux fils de phase de la ligne primaire à la tension U_{20} entre deux fils de phase de la ligne secondaire à vide.</p>	$m_T = \frac{U_{20}}{U_1}$
---	----------------------------

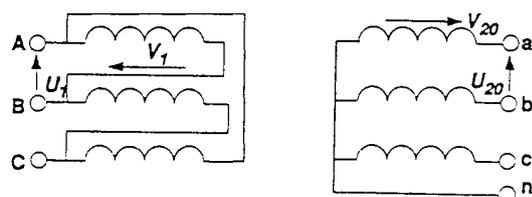
Relation entre le couplage et les rapports de transformation

Le rapport de transformation global ou triphasé est étroitement lié au type de couplage retenu pour le primaire et le secondaire.

Les valeurs de m_T (rapport de transformation triphasé) en fonction de m_v (rapport de transformation du transformateur monophasé à vide) pour les différents types de couplages varient.

a) les couplages du transfo primaires et secondaires sont différents

Exemple : Couplage D – y



Pour un couplage D – y , en notant par V_1 et V_{20} les tensions aux bornes des enroulements et par U_1 et U_{20} les tensions entre fils de phases :

$$U_1 = V_1 \quad \text{et} \quad U_{20} = V_{20}\sqrt{3}$$

Le rapport de transformation en monophasé à vide aurait pour valeur : $m_v = \frac{V_{20}}{V_1}$

Le rapport de transformation en triphasé à vide est alors égal à : $m_T = \frac{U_{20}}{U_1} = \frac{V_{20}\sqrt{3}}{V_1}$ soit
 $m_T = m_v\sqrt{3}$

b) pour les couplages identiques au primaire et au secondaire

Seuls les transformateurs présentant un couplage primaire analogue au couplage secondaire offrent un rapport de transformation à vide identique à celui du transformateur monophasé :

$m_v = m_T$ pour les couplages identiques :

- Couplage étoile – étoile (Y – y).
- Couplage triangle – triangle (D – d)

Tableau récapitulatif :

Le tableau donne tous les relations entre les rapports de transformation pour tous les couplages

Couplage	U_{20}	U_1	m_T
Y - y	$V_{20} \sqrt{3}$	$V_1 \sqrt{3}$	m_v
Y - d	V_{20}	$V_1 \sqrt{3}$	$\frac{m_v}{\sqrt{3}}$
Y - z	$V_{20} \frac{3}{2}$	$V_1 \sqrt{3}$	$m_v \frac{\sqrt{3}}{2}$
D - y	$V_{20} \sqrt{3}$	V_1	$m_v \sqrt{3}$
D - d	V_{20}	V_1	m_v
D - z	$V_{20} \frac{3}{2}$	V_1	$m_v \frac{3}{2}$

Rapports de transformation selon les couplages.

Couplage D → Y

$$M = \frac{U_2(\text{réseauY})}{U_1(\text{réseauD})} =$$

Couplage Y → D

$$M = \frac{U_2(\text{réseau})}{U_1(\text{réseau})}$$

Couplage des enroulements des transformateurs triphasés

1) Diagramme vectoriel des enroulements primaires et secondaires

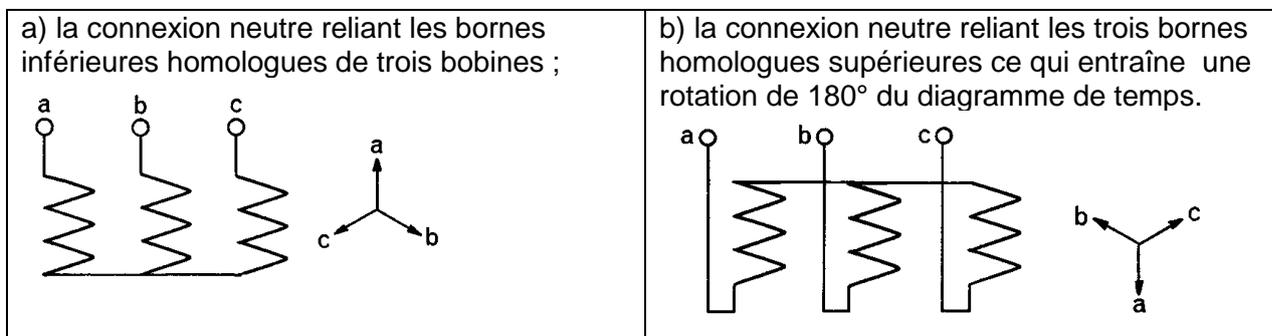
Raisonnons par exemple sur l'enroulement basse tension. Nous désignons ses trois bornes par a, b, c (éventuellement encore n s'il y a un neutre).

Nous convenons de représenter verticalement la tension entre l'extrémité supérieure et l'extrémité inférieure de la bobine placée sur le noyau 1.

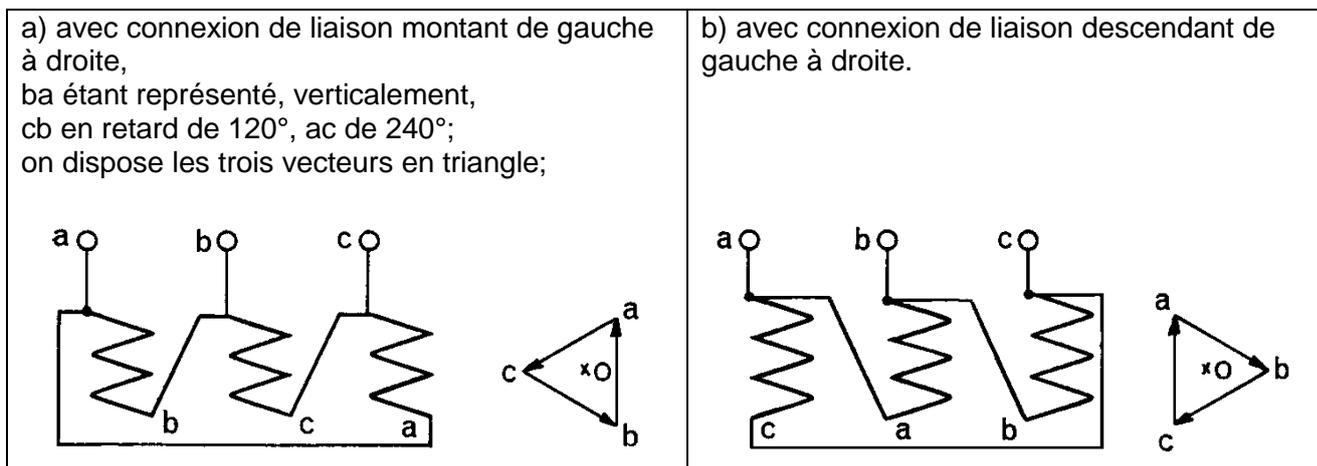
La tension de la bobine placée sur le noyau médian sera en retard de 120° sur la bobine 1 et la bobine placée sur le noyau 3 sera en retard de 240° par rapport à la bobine 1.

Diagramme de temps des tensions suivant le mode de connexion des enroulements.

Groupement en étoile (notation : y) :



Groupement en triangle (notation d) :

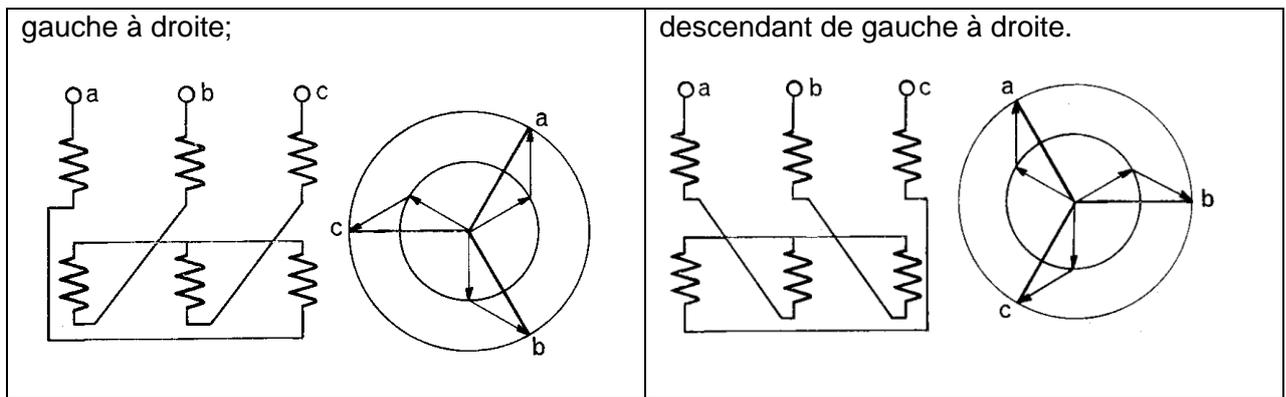


Groupeement connexion zig-zag.

Dans celle-ci chacune des trois bobines basse tension est divisée en deux moitiés.

Une phase est alors constituée par la liaison en série de deux demi-bobines placées sur deux noyaux différents et prises en sens inverse (en allant de la borne d'entrée de la phase à la borne de sortie, on en parcourt une de bas en haut et l'autre de haut en bas).

Connexion entre demi-bobine montant de	avec connexion entre demi-bobine
--	----------------------------------



2) Couplage d'un transformateur triphasé :

Définition couplage : Un couplage du transformateur est l'association d'un mode de connexion de la haute tension avec un mode de connexion de la basse tension (Yz par exemple).

Symbolique

La première lettre de l'indice de couplage est toujours en majuscule (coté haute tension)
 Les enroulements haute tension d'un transformateur peuvent être reliés
 en étoile (symbole Y) ou
 en triangle (D).

La deuxième lettre est en minuscule et indique le système à tension la plus basse.
 Les enroulements basse tension peuvent être montés
 en étoile (symbole y),
 en triangle (d) ou
 en Zig Zag (z). (Peu utilisé en HT)

Dans le système « étoile », le « neutre » (point central de l'étoile) peut être sorti au bornier du transformateur : ceci est indiqué par la présence de la lettre N (ou n)

Exemple, un Dyn11 définit donc un transformateur dont :

- le système triphasé de tension élevé est en « triangle » ;
- le système triphasé de tension basse est en « étoile » avec neutre sorti (indiqué par le « n ») ;
- le décalage entre les deux systèmes est de 330° (= -30° ou bien $11 * 30^\circ$).

Représentation schématique d'un transformateur triphasé,

On fait les conventions suivantes. On note par :

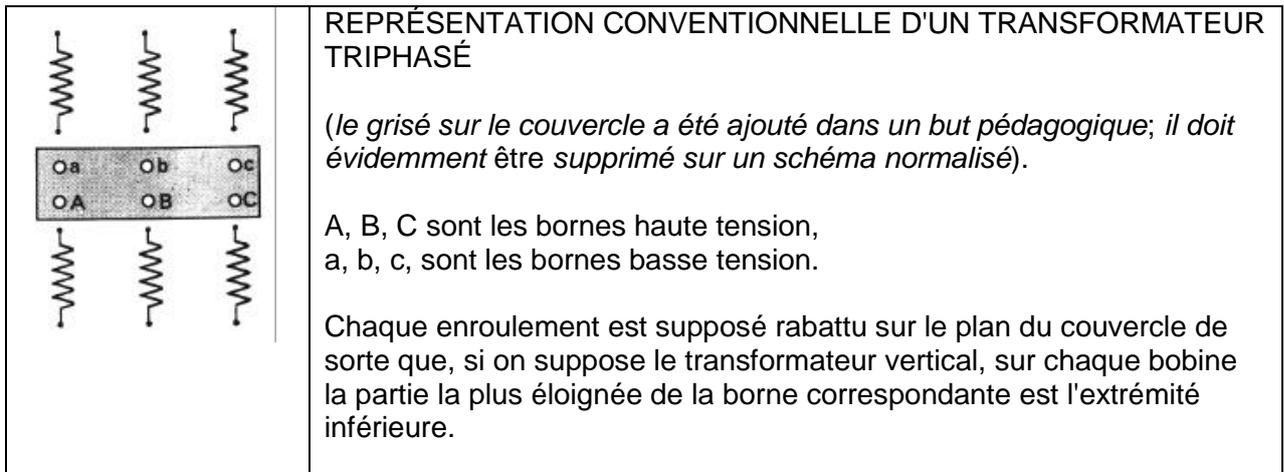
- A, B, C les bornes de la haute tension, (majuscule)
- a, b, c les bornes de la basse tension. (minuscule)

Bornes homologues : Sur le couvercle les bornes homologues sont en regard, la borne A étant à gauche d'un observateur placé devant le côté haute tension.

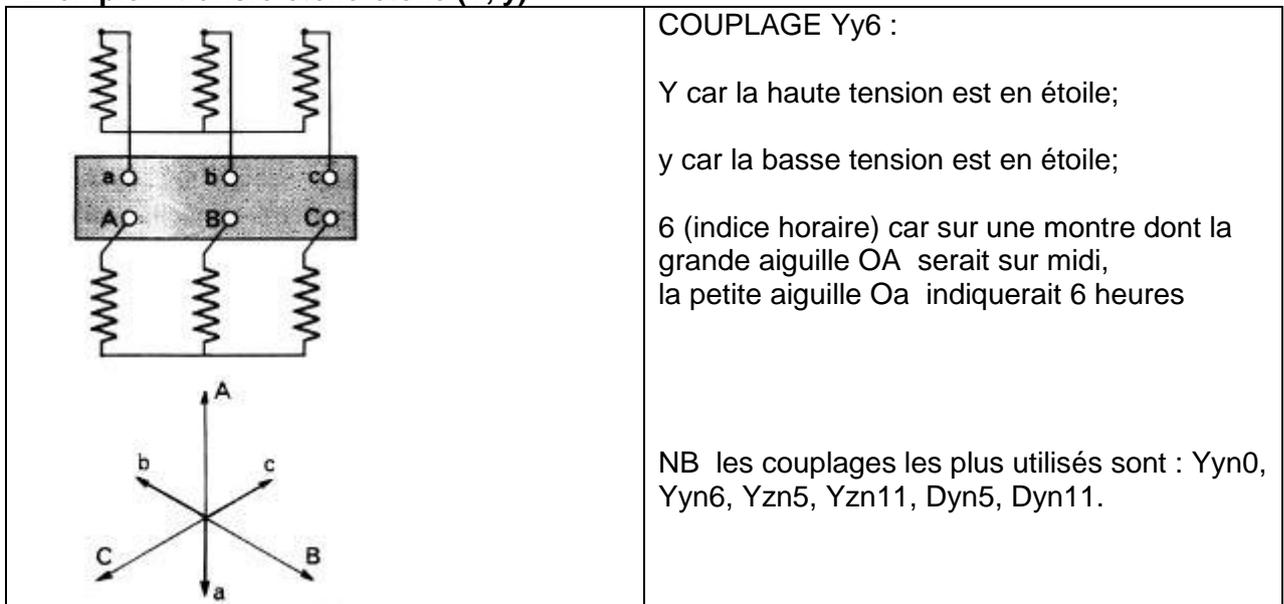
Pour représenter l'enroulement, on suppose l'observateur placé face aux connexions qu'il représente, soit du côté A, B, C quand il étudie la haute tension, soit du côté a, b, c, quand il étudie la basse tension.

L'ensemble se présente donc comme un rabattement sur le plan du couvercle, les parties supérieures des enroulements se trouvant au voisinage des bornes, les parties inférieures à l'opposé.

Nous supposons toujours dans nos schémas que les enroulements sont bobinés dans le même sens.



Exemple : transfo étoile-étoile (Y, y)



Indice horaire déphasage entre le primaire et le secondaire

Traçons les diagrammes de temps des enroulements haute et basse tension en faisant coïncider leurs centres. Nous obtenons le diagramme Vectoriel du transformateur :

L'angle au centre qui caractérise le déphasage des deux réseaux s'appelle le déplacement angulaire.

L'indice horaire donne, par pas de 30°, le déphasage horaire en 12èmes de tour (comme sur une montre) entre le primaire et le secondaire du transformateur
(ex.: 11= 11x30° = 330° en sens horaire.

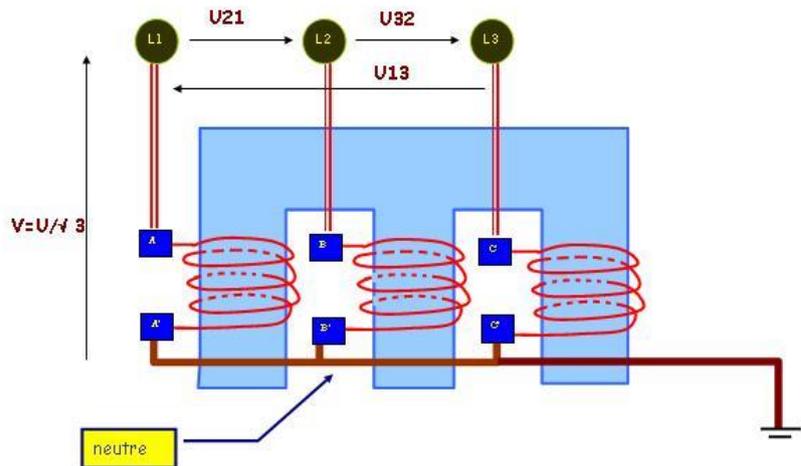
Dans l'exemple : Le chiffre 6 est l'indice **horaire**. Il caractérise le déplacement angulaire et signifie que si on considère

- OA comme la grande aiguille d'une montre,
- Oa comme la petite aiguille d'une montre,
- Cette montre indiquerait ici 6 heures.

On trace tous les diagrammes vectoriels de façon que OA soit dirigé au tableau verticalement vers le haut, c'est-à-dire que la grande aiguille soit sur midi

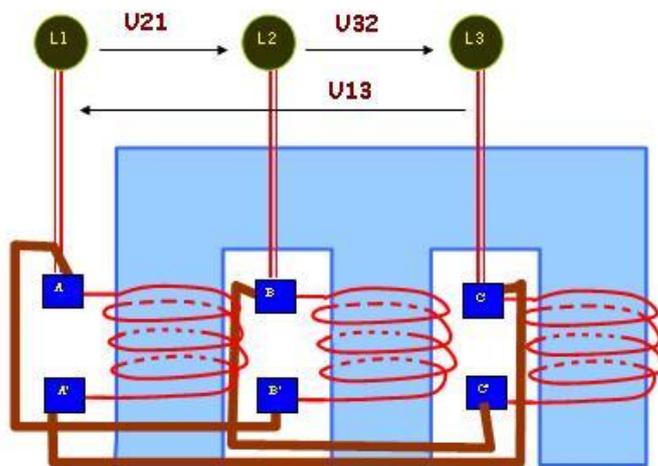
LE CONNEXION ETOILE :

Y Ce couplage permet d'obtenir deux tensions dans le rapport racine de trois suivant que l'on utilise le neutre ou pas. Il supporte d'autre part le déséquilibre des charges avec le neutre utilisé.



LE CONNEXION TRIANGLE : D

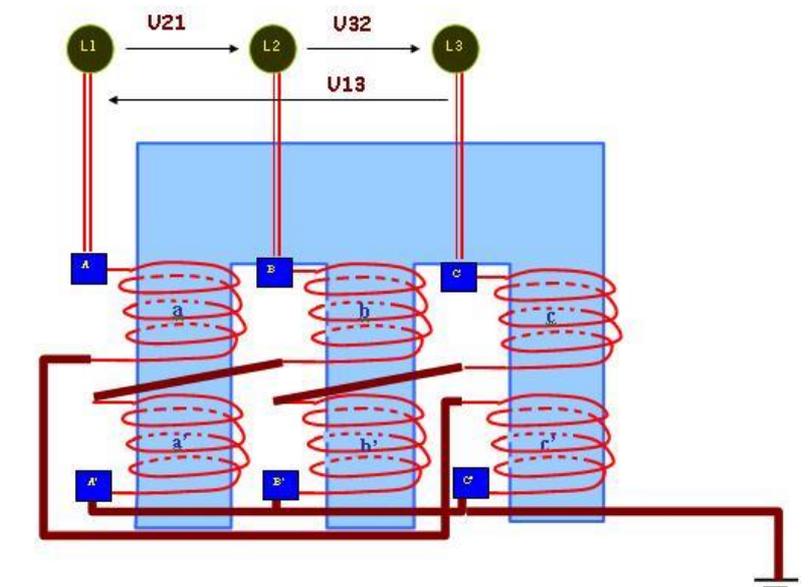
Une seule tension et nécessite *plus de spires* par colonne pour une même tension de ligne.



LE CONNEXION ZIGZAG : Z

Il est composé de deux demis enroulements placés sur des colonnes différentes.

- présente les avantages du couplage étoile (point neutre disponible)
- meilleure répartition de la charge entre les colonnes en régime déséquilibré
- exige 1,16 fois plus de spires que le couplage étoile.

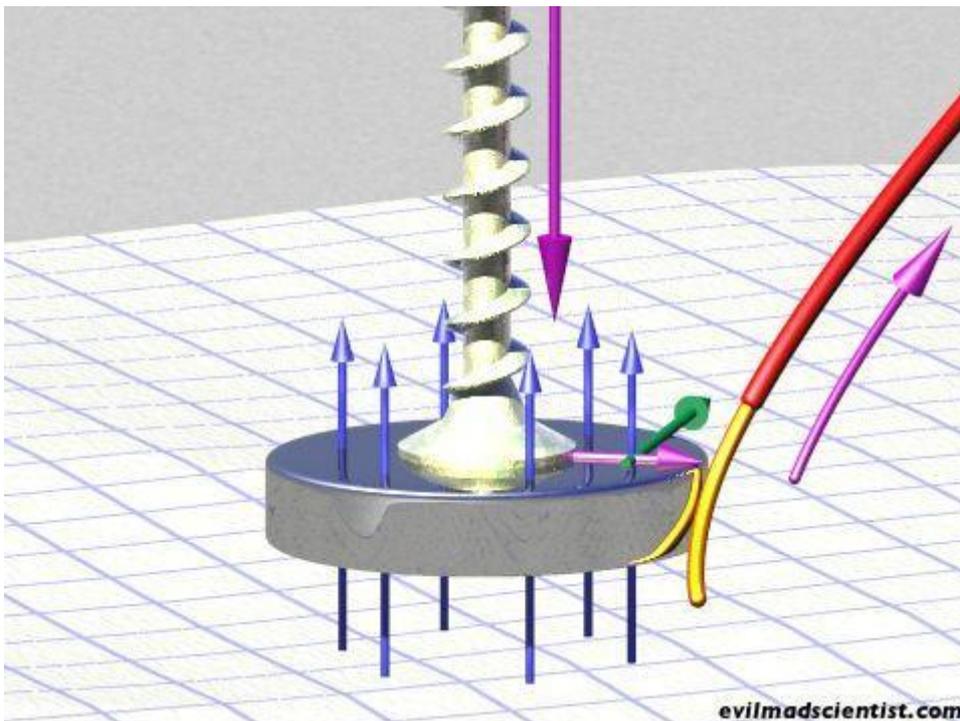
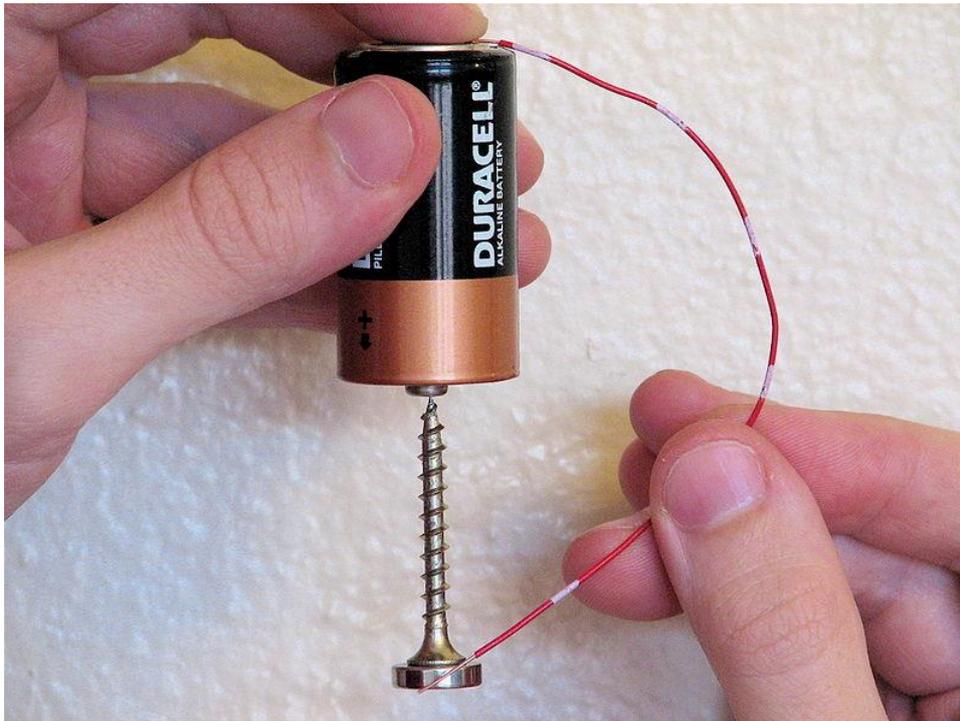


utilisé pour les secondaires uniquement

Référence : http://prof.guedon.org/article.php3?id_article=145

Le Moteur à Courant Continu

Le moteur le plus simple : le moteur homopolaire



Le courant est radial dans le plan de l'aimant (flèche rose) ;

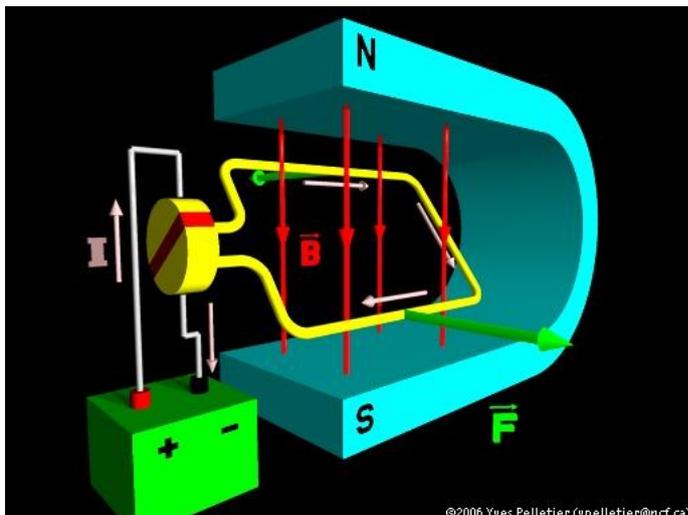
Le champ magnétique dans l'axe de l'aimant lui est perpendiculaire (flèche bleu) ;

Il en résulte une force tangente à la circonférence de l'aimant (flèche verte) et donc un couple de rotation par rapport au centre de l'aimant !

Voir : <http://sciencetonnante.wordpress.com/2011/05/23/le-moteur-homopolaire-le-moteur-electrique-le-plus-simple-du-monde/>

Moteur DC (courant continu) classique

Principe



Le champ en rouge est créé par un entrefer d'aimant permanent ;
Le courant dans la spire jaune (bobine ici limitée à une seule spire) est perpendiculaire au champ (flèche blanche) ;
Une force est donc induite perpendiculaire au plan du champ et du courant (flèches vertes) ;
Les deux flèches vertes forment un couple par rapport à l'axe de la bobine qui se met à tourner pour s'orienter de telle manière à ce que le flux soit maximum. Par inertie, la bobine va dépasser cette position horizontale et à ce moment, la tension s'inversant via les balais, un nouveau couple apparaît pour prolonger le mouvement et ainsi de suite.

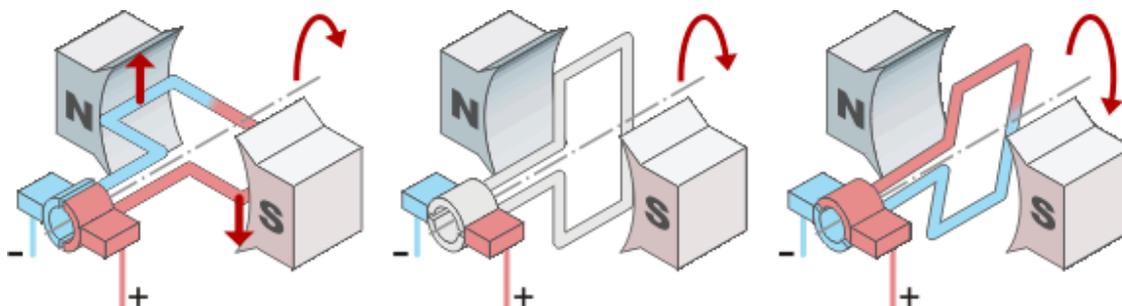
Le moteur à courant continu se compose donc:

- de l'inducteur ou du stator,
- de l'induit ou du rotor,
- du collecteur et des balais.

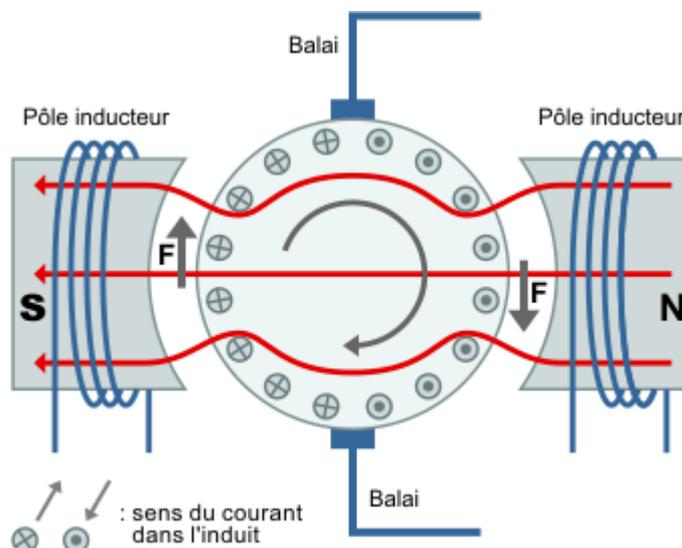
Lorsque le bobinage d'un inducteur de moteur est alimenté par un courant continu, sur le même principe qu'un moteur à aimant permanent (comme la figure ci-dessous), il crée un champ magnétique (flux d'excitation) de direction Nord-Sud.

Une spire capable de tourner sur un axe de rotation est placée dans le champ magnétique. De plus, les deux conducteurs formant la spire sont chacun raccordés électriquement à un demi collecteur et alimentés en courant continu via deux balais frotteurs.

D'après la loi de Laplace (tout conducteur parcouru par un courant et placé dans un champ magnétique est soumis à une force), les conducteurs de l'induit placés de part et d'autre de l'axe des balais (ligne neutre) sont soumis à des forces F égales mais de sens opposé en créant un couple moteur : l'induit se met à tourner !



Si le système balais-collecteurs n'était pas présent (simple spire alimentée en courant continu), la spire s'arrêterait de tourner en position verticale sur un axe appelé communément "ligne neutre". Le système balais-collecteurs a pour rôle de faire commuter le sens du courant dans les deux conducteurs au passage de la ligne neutre. Le courant étant inversé, les forces motrices sur les conducteurs le sont aussi permettant ainsi de poursuivre la rotation de la spire.



Dans la pratique, la spire est remplacée par un induit (rotor) de conception très complexe sur lequel sont montés des enroulements (composés d'un grand nombre de spires) raccordés à un collecteur "calé" en bout d'arbre. Dans cette configuration, l'induit peut être considéré comme un seul et même enroulement semblable à une spire unique.

Avantages et inconvénients du moteur à courant continu

Avantages

- accompagné d'un variateur de vitesse électronique, il possède une large plage de variation (1 à 100 % de la plage),
- régulation précise du couple,
- son indépendance par rapport à la fréquence du réseau fait de lui un moteur à large champ d'application,
- ...

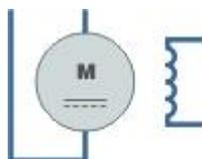
Inconvénients

- peu robuste par rapport au machine asynchrone,
- investissement important et maintenance coûteuse (entretien du collecteur et des balais,
- ...

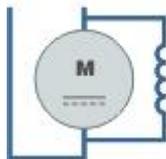
Types de moteurs à courant continu

Suivant l'application, les bobinages du l'inducteur et de l'induit peuvent être connectés de manière différente. On retrouve en général :

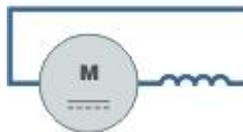
Des moteurs à excitation indépendante.



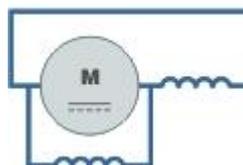
Des moteurs à excitation parallèle.



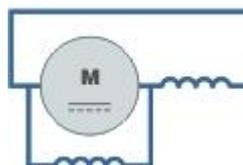
Des moteurs à excitation série.



Des moteurs à excitation composée.



La plupart des machines d'ascenseur sont configurées en excitation parallèle ou indépendante. L'inversion du sens de rotation du moteur s'obtient en inversant soit les connexions de l'inducteur soit de l'induit.



La plupart des machines d'ascenseur sont configurées en excitation parallèle ou indépendante. L'inversion du sens de rotation du moteur s'obtient en inversant soit les connexions de l'inducteur soit de l'induit.

L'inducteur

L'inducteur d'un moteur à courant continu est la partie statique du moteur. Il se compose principalement :

- de la carcasse,
- des paliers,
- des flasques de palier,
- des portes balais.



Inducteur.

Le coeur même du moteur comprend essentiellement :

- Un ensemble de paires de pôles constitué d'un empilement de tôles ferro-magnétiques.
- Les enroulements (ou bobinage en cuivre) destinés à créer le champ ou les champs magnétiques suivant le nombre de paires de pôles.

Pour des moteurs d'une certaine puissance, le nombre de paires de pôles est multiplié afin de mieux utiliser la matière, de diminuer les dimensions d'encombrement et d'optimiser la pénétration du flux magnétique dans l'induit.

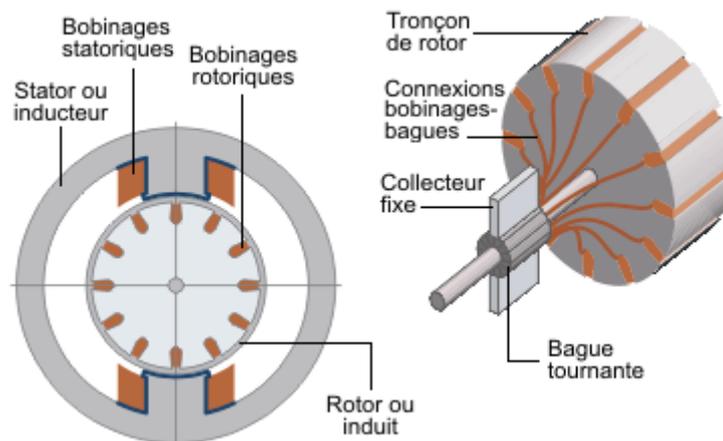
L'induit

L'induit du moteur à courant continu est composé d'un arbre sur lequel est empilé un ensemble de disques ferro-magnétiques. Des encoches sont axialement pratiquées à la périphérie du cylindre formé par les disques empilés. Dans ces encoches les enroulements (bobines de l'induit) sont "bobinés" selon un schéma très précis et complexe qui nécessite une main d'oeuvre particulière (coûts importants). Pour cette raison, on préfère, en général, s'orienter vers des moteurs à courant alternatif plus robuste et simple dans leur conception.



Induit.

Chaque enroulement est composé d'une série de sections, elles même composées de spires; une spire étant une boucle ouverte dont l'aller est placé dans une encoche de l'induit et le retour dans l'encoche diamétralement opposée. Pour que l'enroulement soit parcouru par un courant, ses conducteurs de départ et de retour sont connectés aux lames du collecteur (cylindre calé sur l'arbre et composé en périphérie d'une succession de lames de cuivre espacée par un isolant).



Composition de l'induit.

L'interface entre l'alimentation à courant continu et le collecteur de l'induit est assurée par les balais et les porte-balais.

Les balais

Les balais assurent le passage du courant électrique entre l'alimentation et les bobinages de l'induit sous forme d'un contact par frottement. Les balais sont en graphite et constituent, en quelques sortes, la pièce d'usure. Le graphite en s'usant libère une poussière qui rend le moteur à courant continu sensible à un entretien correct et donc coûteux.



L'ensemble balais, porte-balais et collecteur.

Le point de contact entre les balais et le collecteur constitue le point faible du moteur à courant continu. En effet, c'est à cet endroit, qu'outre le problème d'usure du graphite, la commutation (inversion du sens du courant dans l'enroulement) s'opère en créant des micros-arcs (étincelles) entre les lamelles du collecteur; un des grands risques de dégradation des collecteurs étant leur mise en court-circuit par usure.

Réglage de la vitesse de rotation

Relation Vitesse et force contre-électromotrice à flux constant

Lorsque l'induit est alimenté sous une tension continue ou redressée U , il se produit une force contre-électromotrice E .

On a :

$$E = U - R \times I \text{ [volts]}$$

Où,

- R = la résistance de l'induit [ohm].
- I = le courant dans l'induit [ampère].

La force contre-électromotrice est liée à la vitesse et à l'excitation du moteur.

On a :

$$E = k \times \omega \times \phi \text{ [volt]}$$

Où,

- k = constante propre au moteur (dépendant du nombre de conducteurs de l'induit).
- ω = la vitesse angulaire de l'induit [rad/s].
- ϕ = le flux de l'inducteur [weber].

En analysant la relation ci-dessus, on voit, qu'à excitation constante Φ , la force contre-électromotrice E est proportionnelle à la vitesse de rotation.

Relation Couple et flux

Quant au couple moteur, il est lié au flux inducteur et au courant de l'induit par la relation suivante.

On a :

$$C = k \times \phi \times I \text{ [N.m]}$$

Où,

- k = constante propre au moteur (dépendant du nombre de conducteurs de l'induit).
- ϕ = le flux de l'inducteur [weber].
- I = le courant dans l'induit [ampère].

En analysant la relation ci-dessus, on voit qu'en réduisant le flux, le couple diminue.

Variation de la vitesse

Au vu des relations existant entre la vitesse, le flux et la force contre-électromotrice, il est possible de faire varier la vitesse du moteur de deux manières différentes. On peut :

- Augmenter la force contre-électromotrice E en augmentant la tension au borne de l'induit tout en maintenant le flux de l'inducteur constant. On a un fonctionnement dit à "couple constant". Ce type de fonctionnement est intéressant au niveau de la conduite d'ascenseur.
- Diminuer le flux de l'inducteur (flux d'excitation) par une réduction du courant d'excitation en maintenant la tension d'alimentation de l'induit constante. Ce type de fonctionnement impose une réduction du couple lorsque la vitesse augmente.

Le groupe Ward-Leonard



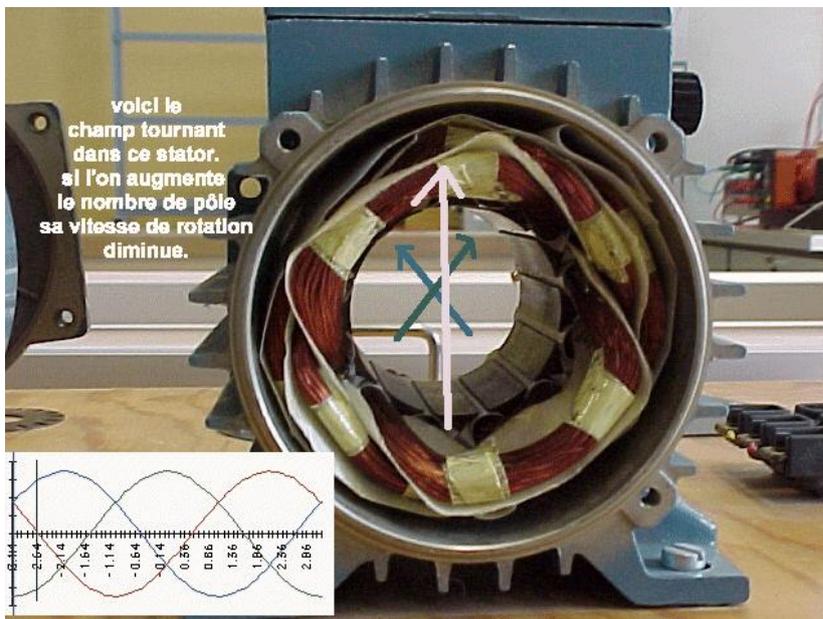
Le groupe Ward-Léonard représente l'ancienne génération des treuils d'ascenseur à traction à câbles. Ce système permettait de faire varier la vitesse d'un moteur à courant continu à excitation indépendante en réglant la tension de l'induit par l'intermédiaire d'une génératrice à courant continu dont on faisait varier l'excitation; la génératrice étant entraînée mécaniquement par un moteur à courant alternatif classique.

Pour une faible variation du courant d'excitation de la génératrice, il était possible de maîtriser des puissances énormes de moteurs à courant continu dans une plage de variation de vitesse très étendue.

L'électronique de régulation de vitesse est venue supplanter le système du groupe Ward-Léonard où le variateur de vitesse électronique vient contrôler :

- soit directement un moteur à courant alternatif,
- soit le moteur à courant continu seul rescapé du groupe Ward-Léonard.

La notion de champ tournant



Les 3 petites flèches représentent les 3 flux générés par les enroulements (1 paire de pôle dans cet exemple) du stator. Ces flux varient selon la valeur instantanée du courant qui les traverse et sont dans l'axe des enroulements.

La plus grande des flèches représente la résultante magnétique des trois autres champs axiaux. Cette résultante tourne au cours du temps. Elle est appelée "champ tournant". Dans un moteur à une paire de pôles, elle fait un tour en 1 période (soit 20 ms à 50 Hz) ce qui donne une vitesse maximale des moteurs triphasés de 3000 tours par minutes.

AUTRE ANIMATION : <http://www.univ-lemans.fr/enseignements/physique/02/electri/triphase.html>

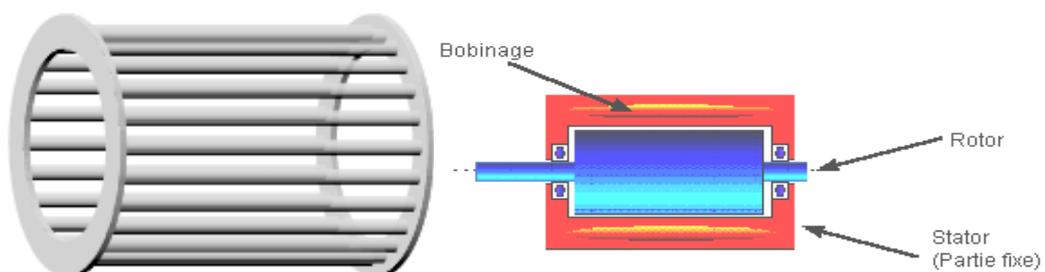
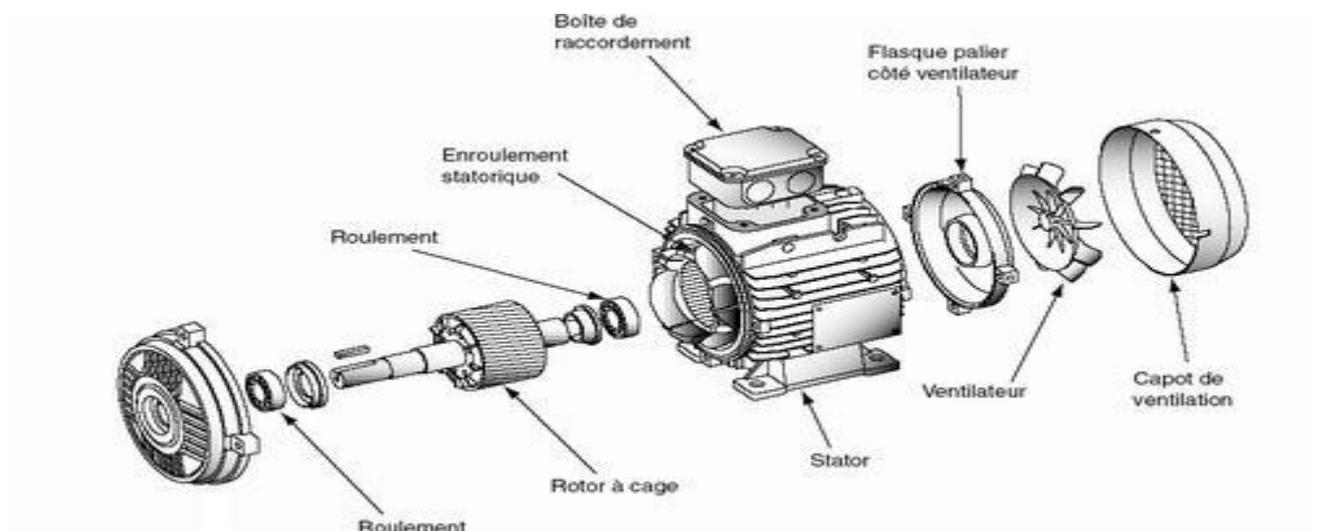
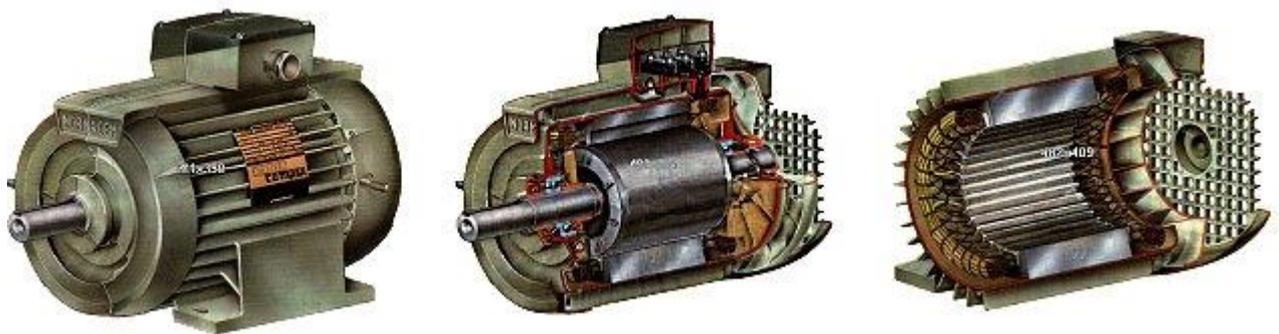
Le moteur asynchrone

Généralités

Le moteur asynchrone couplé à un variateur de fréquence est de loin le type de moteur le plus utilisé pour les applications où il est nécessaire de contrôler la vitesse et le déplacement d'une charge.

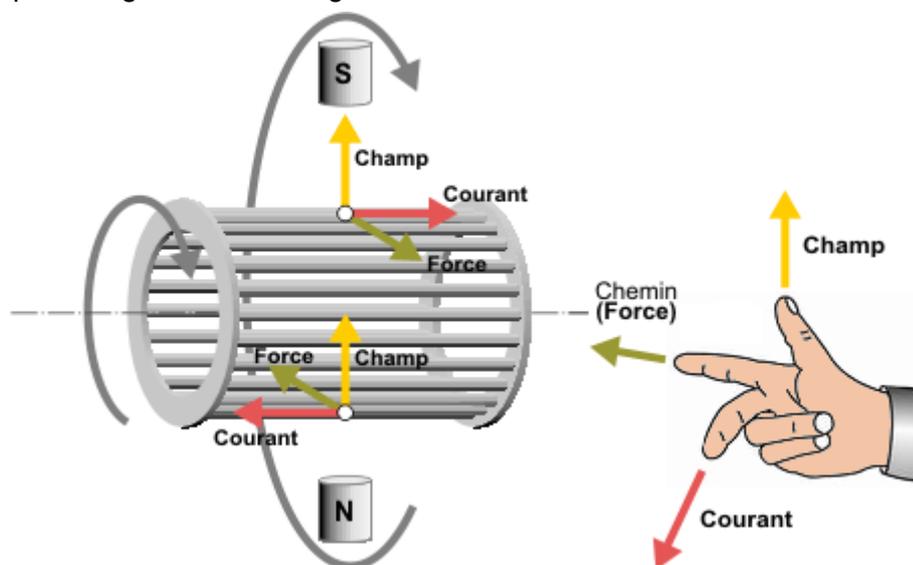
Le système moteur-varianteur convient bien pour des applications tels que les ascenseurs car on recherche une excellente précision à fois au niveau de la vitesse (confort des utilisateurs) et de la précision de la position de la cabine par rapport aux paliers.

Quant au moteur asynchrone seul, sa popularité résulte du peu d'entretien nécessaire, de sa simplicité de construction, de sa standardisation et de sa robuste.



Le principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone repose :

- D'une part sur la création d'un courant électrique induit dans un conducteur placé dans un champ magnétique tournant. Le conducteur en question est un des barreaux de la cage d'écureuil ci-dessous constituant le rotor du moteur. L'induction du courant ne peut se faire que si le conducteur est en court-circuit (c'est le cas puisque les deux bagues latérales relient tous les barreaux).
- D'autre part, sur la création d'une force motrice sur le conducteur considéré (parcouru par un courant et placé dans un champ magnétique tournant ou variable) dont le sens est donné par la règle des trois doigts de la main droite.



Comme montré sur le schéma ci-dessus, le champ tournant, à un instant donné, est orienté vers le haut. En considérant deux conducteurs diamétralement opposés, on constate que les courants induits dans ces deux conducteurs sont en sens inverse et, associés au champ magnétique, créent des forces motrices en sens inverse. Le rotor étant libre de tourner sur l'axe X-Y, les deux forces s'associent pour imprimer aux deux conducteurs un couple permettant la rotation de la cage d'écureuil : le moteur électrique est inventé.

Pour entretenir la rotation du moteur, il est nécessaire de faire varier soit le courant dans les conducteurs de la cage, soit le champ magnétique. Dans un moteur asynchrone, c'est le champ magnétique qui varie sous forme de champ tournant créé dans le **stator**.

Au démarrage le champ tournant balaye les conducteurs de son flux à la vitesse angulaire de synchronisme. Le rotor mis en rotation tend à rattraper le champ tournant. Pour qu'il y ait un couple entretenu au niveau des conducteurs, la variation de flux doit être présente en permanence; ce qui signifie que si les conducteurs tournent à la vitesse de synchronisme comme le champ tournant, la variation de flux sur les conducteurs devient nulle et le couple moteur disparaît.

Un rotor de moteur asynchrone ne tourne donc jamais à la vitesse de synchronisme (50 Hz). Pour un moteur à une paire de pôles (à 50 Hz, la vitesse de rotation du champ tournant est de 3 000 [tr/min]) la vitesse de rotation du rotor peut être de 2 950 [tr/min] par exemple; c'est la notion de **glissement**.

Constitution du stator

Le stator d'un moteur triphasé comme son nom l'indique, est la partie statique du moteur asynchrone. Il est identique à celui d'un moteur synchrone. Il se compose principalement :

- de la carcasse,
- des paliers,
- des flasques de palier,
- du ventilateur refroidissant le moteur,
- le capot protégeant le ventilateur.

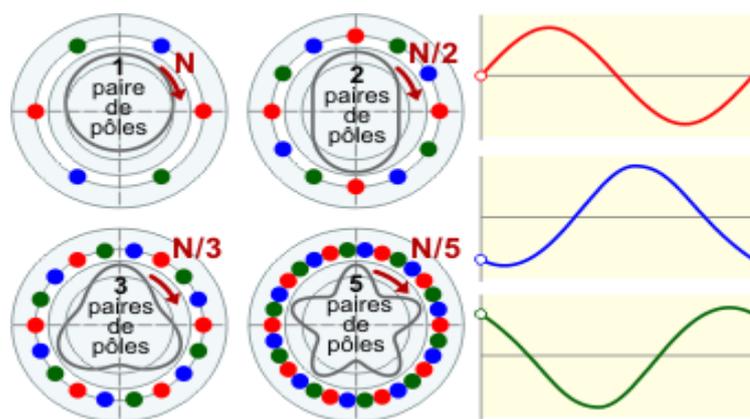


Stators.

L'intérieur du stator comprend essentiellement :

- un noyau en fer feuilleté de manière à canaliser le flux magnétique,
- les enroulements (ou bobinage en cuivre) des trois phases logés dans les encoches du noyau.

Dans un moteur triphasé les enroulements sont au nombre minimum de trois décalés l'un de l'autre de 120° comme le montre le schéma ci-dessous.



Influence du nombre de paires de pôles sur la vitesse de rotation et de la forme du champ statorique résultant.

Lorsque les enroulements du stator sont parcourus par un courant triphasé, ceux-ci produisent un champ magnétique tournant à la vitesse de synchronisme. La vitesse de synchronisme est fonction de la fréquence du réseau d'alimentation (50 Hz en Europe) et du nombre de paires de pôles. Vu que la fréquence est fixe, la vitesse de rotation du



champ tournant du moteur ne peut varier qu'en fonction du nombre de paires de pôles.

Paires de pôles	1	2	3	4	6
Nombre de pôles	2	4	6	8	12
n_0 [tr/min]	3 000	1 500	1 000	750	500

Constitution du rotor

Le rotor est la partie mobile du moteur asynchrone. Couplé mécaniquement à un treuil d'ascenseur par exemple, il va créer un couple moteur capable de fournir un travail de montée et de descente de la cabine d'ascenseur. Il se compose essentiellement d'un empilage de disques minces isolés entre eux et clavetés sur l'arbre du rotor afin de canaliser et de faciliter le passage du flux magnétique.

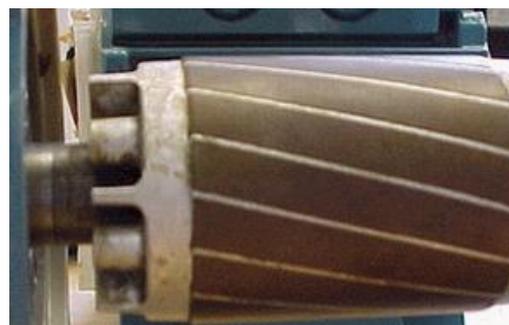
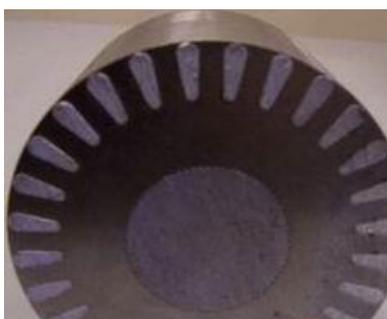
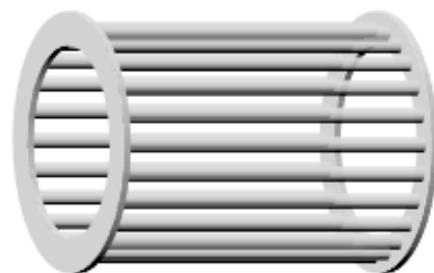
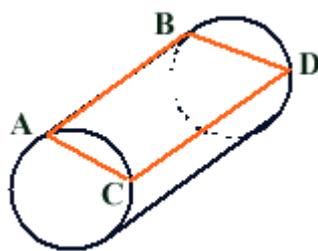
Il existe 2 types de rotor :

1) Moteur à cage :

Le rotor n'est PAS relié à un autre circuit, il n'y a donc PAS de bagues, **il est en court-circuit**

La cage d'écurieuil en aluminium coulé dont les barreaux sont de forme trapézoïdale pour les moteurs asynchrones standards et fermés latéralement par deux "flasques" conductrices.

En pratique cet enroulement est réalisé en "cage d'écurieuil" c'est à dire par un ensemble de barres de cuivre, aluminium ou laiton disposées à la périphérie du rotor et reliées entre elles par un anneau de forte section. Ce système se justifie relativement aisément :



Avantages :

- Construction SIMPLE, ROBUSTE, ECONOMIQUE
- FACILE CAR DEMARRE SEUL

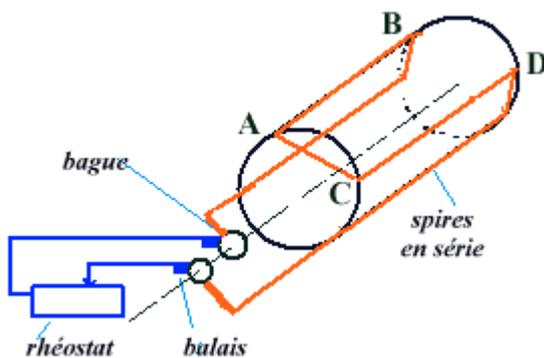
Inconénients

- attention à la pointe de courant au démarrage: voir plus loin procédure de démarrage

2) le rotor à bagues

L'extrémité libre de chaque phase est raccordée à une bague isolée sur laquelle frotte un balai.

Au démarrage, on insère des Résistances. Après le démarrage, les bagues sont court-circuitées.



Le schéma ne montre qu'une phase mais en réalité il y a 3 bagues et 3 groupes de résistances

Principe de fonctionnement

Stator

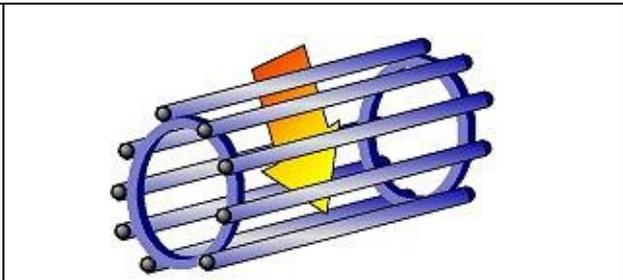
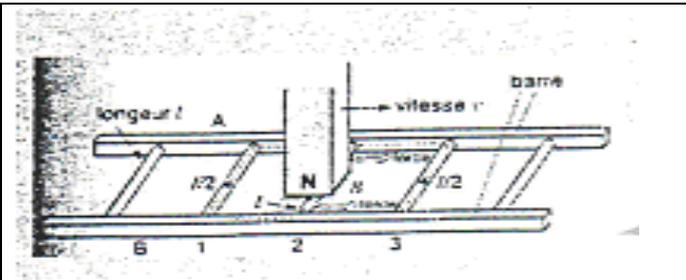
Le courant triphasé appliqué au stator produit un champ tournant. (voir chapitre précédent)

Lorsque les enroulements du stator sont parcourus par un courant triphasé, ceux-ci produisent un champ magnétique tournant à la vitesse de synchronisme. La vitesse de synchronisme est fonction de la fréquence du réseau d'alimentation (50 Hz en Europe) et du nombre de paires de pôles. En pratique, vu que la fréquence du réseau est fixe, la vitesse de rotation du champ tournant du moteur ne peut varier qu'en fonction du nombre de paires de pôles.

Paires de pôles (p)	1	2	3	4	6
Nombre de pôles	2	4	6	8	12
n_0 [tr/min]	3 000	1 500	1 000	750	500

Rotor :

Dans un moteur asynchrone réel, l'échelle est recourbée sur elle-même (cage d'écureuil)



Dans chacun des conducteurs de la figure ci-dessus, une tension $E = B \times l \times v$ est induite.
Un courant I se met à circuler dans le petit circuit qui est, momentanément en dessous de l'aimant

Le conducteur du rotor de la cage placé dans le champ magnétique tournant (symbolisé dans le schéma par la flèche jaune large) **va induire une tension induite dans les barres.** Et comme le circuit est fermé (les deux bagues latérales relient tous les barreaux, il est en court-circuit), **il y a une circulation de courant induit**

Le courant I traversant une zone où règne un champ magnétique engendre une force (de Laplace) appliquée au conducteur.

Le courant induit dans les barres associé au champ magnétique variable (champ tournant) va donner lieu à une force (RMG)

Cette force agit dans une direction telle qu'elle entraîne le conducteur dans le sens du déplacement de l'aimant
-> Déplacement de l'échelle

Rappel de théorie :
couple de forces : Ensemble de deux forces parallèles, de sens contraires et de même intensité ou système équivalent à cet ensemble.

Comme montré sur le schéma le champ tournant, à un instant donné, est orienté vers le haut (flèche jaune verticale dirigée vers le dessus)

Dans les deux conducteurs diamétralement opposés (en haut et en bas du schéma), les courants induits sont en sens inverse.

Ces courants induits associés au champ magnétique, créent des forces motrices en sens inverse.

Le rotor étant libre de tourner, les deux forces s'associent pour imprimer aux

	deux conducteurs un couple permettant la rotation de la cage d'écureuil
--	--

Résumé des étapes du principe de fonctionnement du moteur asynchrone

- Les tensions d'alimentation d'un système triphasé appliquées au stator d'un moteur asynchrone y produisent un champ tournant
- Le champ tournant induit une tension dans les barres du rotor.
- La tension induite donne naissance à des courants intenses dans les barres
- Les barres portant un courant et situées dans un champ magnétique, sont soumises à des forces électromagnétiques. → couple de forces
- Ces forces tendent à entraîner le rotor dans le sens de rotation du champ

Au démarrage

Au démarrage le champ tournant balaye les conducteurs de son flux à la vitesse angulaire de synchronisme. Le rotor mis en rotation tend à rattraper le champ tournant.

Un rotor de moteur asynchrone ne tourne donc jamais à la vitesse de synchronisme

Explication :

Pour qu'il y ait un couple entretenu au niveau des conducteurs, la variation de flux doit être présente en permanence;

Donc si les conducteurs tournent à la vitesse de synchronisme comme le champ tournant, la variation de flux sur les conducteurs devient nulle et le couple moteur disparaît.

Exemple :

Pour un moteur à une paire de pôles (à 50 Hz, la vitesse de rotation du champ tournant est de 3 000 [tr/min]) la vitesse de rotation du rotor peut être de 2 950 [tr/min] par exemple; c'est la notion de **glissement**

Glissement, couple et vitesse de rotation

1) **La vitesse de synchronisme**, est fonction de la fréquence du réseau et du nombre de paires de pôles. Elle s'exprime par la relation suivante :

$$n_s = (f \times 60) / p$$

n_s = vitesse du champ tournant.

f = la fréquence du réseau (en général 50 Hz).

p = le nombre de paires de pôles.

2) Glissement : Comme on l'a vu au niveau du principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone, la vitesse de rotation de l'arbre du moteur est inférieure à la vitesse de synchronisme (vitesse du champ tournant).

Le glissement (g) représente la différence de vitesse de rotation entre l'arbre du moteur et le champ tournant du stator; Le glissement est généralement exprimé en pourcentage de la vitesse de synchronisme n_0 .

$$g = (n_s - n_r) / n_s \quad [\%]$$

n_s = vitesse du champ tournant.
 n_n = vitesse de rotation de l'arbre.

Remarques :

Ordre de grandeur du glissement : A vide : 0,1 à 2% En charge : 3 à 15 %

Au démarrage $n = 0 \rightarrow g = 1$

A la vitesse de synchronisme : $n = n_s \rightarrow g = 0$ (cas théorique)

Couple d'un moteur asynchrone

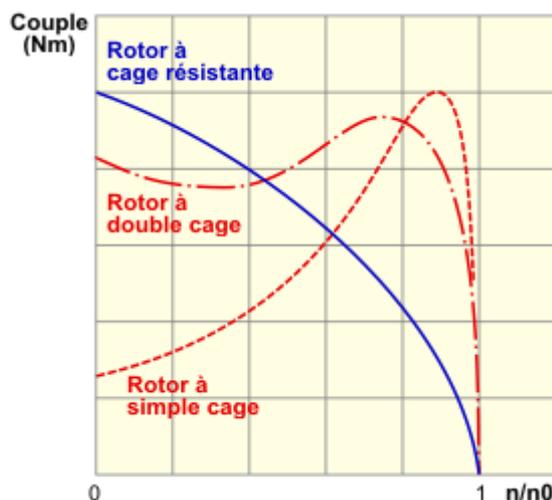
Le couple C d'un moteur asynchrone est fonction de la puissance P et de la vitesse de rotation n du moteur. Il s'exprime par la relation suivante :

$$C = (P \times 9\,550) / n$$

Avec,

- P = Puissance du moteur [W].
- n = la vitesse de rotation du moteur [tr/min].

Une des courbes la plus caractéristique des moteurs asynchrones est celle du couple en fonction du glissement :

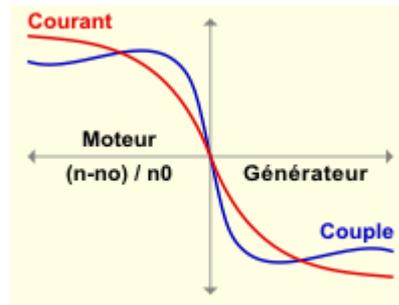


Couple en fonction du rapport :
 vitesse de rotation/vitesse de synchronisme.

Sur le graphe ci-dessus on voit tout de suite qu'il faut choisir le type de moteur en fonction de l'application : pour les motorisations des ascenseurs, on préférera les moteurs à double cage présentant un profil de courbe plus plat en fonction du glissement afin de bénéficier d'un couple relativement constant quelle que soit la charge.

Une des caractéristiques importante du moteur asynchrone, est qu'il peut, dans certaines conditions, se transformer en générateur asynchrone. Lorsqu'une cabine d'ascenseur redescend en charge maximum, le moteur renvoie de l'énergie au réseau.

Les courbes suivantes montrent ce phénomène :



Fonction en moteur ou en générateur suivant le couple résistant .

Démarrage des moteurs synchrones

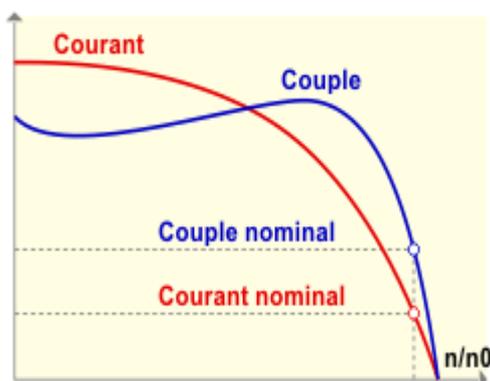
Démarrage direct

Le courant de démarrage est de l'ordre de 5 à 8 fois le courant nominal. Il est impératif de prévoir des systèmes de limitation de courant au démarrage (étoile/triangle, variateur de fréquence, ...).

Le couple de démarrage est important (de l'ordre de 2,5 fois le couple nominal).

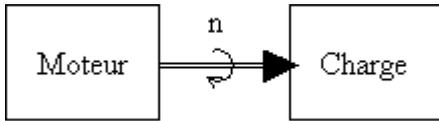
Le couple est maximum pour un glissement de l'ordre de 30 %.

Caractéristiques d'un moteur asynchrone classique



Caractéristique mécanique - $C = f(n)$

Couple moteur et couple résistant

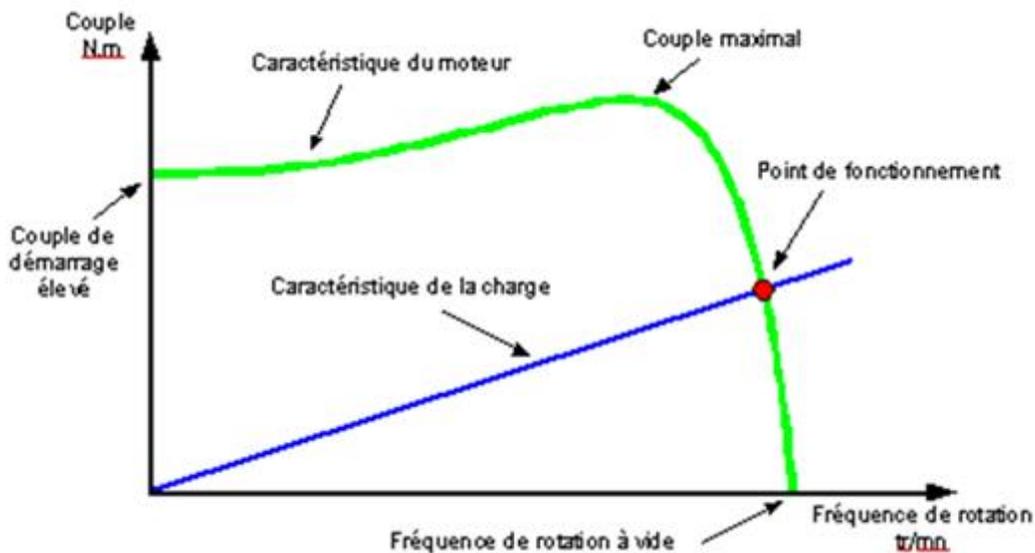


La charge impose un couple résistant T_r ou C_r sur l'arbre qui tourne.
Le couple résistant peut être :

- constant (cas d'un engin de levage)
- croissant (cas d'un ventilateur)

Le moteur doit fournir un couple utile de moment T_u ou C_m

On peut les représenter sur un graphique



Point de fonctionnement du moteur asynchrone

DONC à l'équilibre. $T_u = T_r$. on trace sur le même repère les deux caractéristiques mécaniques et résistantes et ensuite on lit les coordonnées de leur point d'intersection

Démarré ou ne démarre pas ?

Pour qu'il y ait démarrage il faut que $T_u > T_r$

On définit : le **couple accélérateur = couple moteur (T_u) – couple résistant (T_r)**

Si le couple accélérateur est positif, la vitesse augmente ; si le couple accélérateur est négatif, la vitesse diminue.

Remarque sur la stabilité :

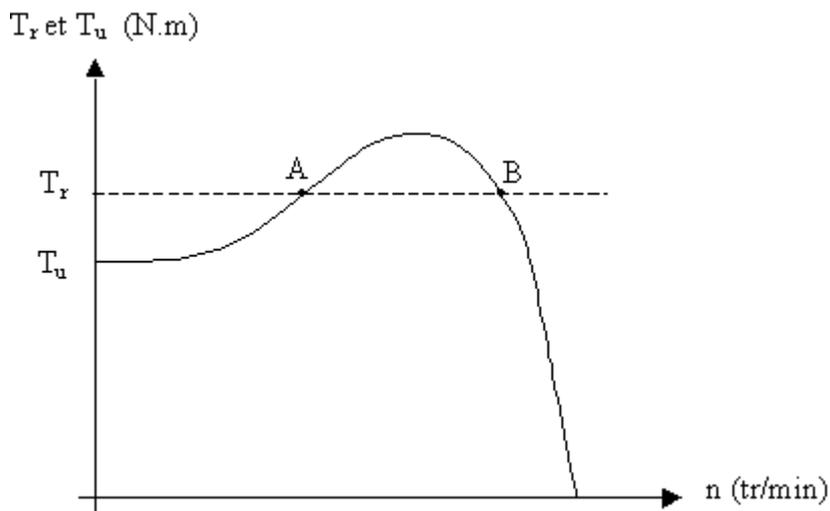
Définition :

Un système est stable si il revient dans sa position d'origine après une perturbation.

Dans le cas suivant :

Il y a deux points de fonctionnement :

- le point A est instable
- le point B est stable



Éléments à retenir :

I démarrage 5 à 8 x I nominal

C démarrage = 0,5 à 2,5 C nominal

I = proportionnel à U car $U = Z I$ avec Z impédance de l'enroulement du stator de moteur

Connaître l'allure de la courbe vitesse/couple

C moteur – C résistant = C accélérateur

Le démarrage direct peut être utilisé dans le cas où :

- la puissance du moteur est faible par rapport à la puissance du réseau, de manière à limiter les perturbations dues à l'appel de courant,
- la machine entraînée ne nécessite pas une mise en vitesse progressive et comporte un dispositif mécanique (réducteur par exemple) qui évite un démarrage trop brutal,
- le couple de démarrage doit être élevé.

Le démarrage direct ne peut pas être utilisé dans le cas où :

- l'appel de courant risque de perturber le bon fonctionnement d'autres appareils branchés sur la même ligne, ceci en raison de la chute de tension qu'il provoque,
- la machine entraînée ne peut accepter des à-coups mécaniques,
- le confort ou la sécurité des utilisateurs demandent un démarrage progressif (cas des escaliers mécaniques par exemple) ,

Il devient dans ces cas nécessaire d'utiliser un artifice pour diminuer l'appel de courant ou le couple de démarrage.

Le compromis:

a) pointe de courant

Nous avons vu que le courant de démarrage était important. Quels sont les éléments qui peuvent souffrir de cette pointe de courant?

- la pointe de courant génère une chute de tension **dans la ligne** et nécessite de produire plus de courant au niveau de la centrale électrique

b) couple

La modification de I entraîne une modification de U et comme le couple est $= f(U^2)$, C_u est modifié.

Le compromis sera donc:

- **de limiter s'il y a lieu la pointe de courant pendant le démarrage**
- **en conservant un couple moteur suffisant pour assurer le démarrage : $C_{\text{démarrage}} > C_{\text{résistant}}$**

Pour ce faire, nous disposons de facteurs influents :

a) si le moteur est alimenté par le réseau à fréquence fixe

- la diminution de la tension d'alimentation, $U_{\downarrow} = Z I_{\downarrow}$
- l'insertion de résistance R $U = (Z + R) I$

b) par la modification de la fréquence

Etude des modes de démarrage possible :

1. Action sur la tension d'alimentation:

La réduction du courant de démarrage est dans le même rapport que celle de la tension d'alimentation. $U = Z I$

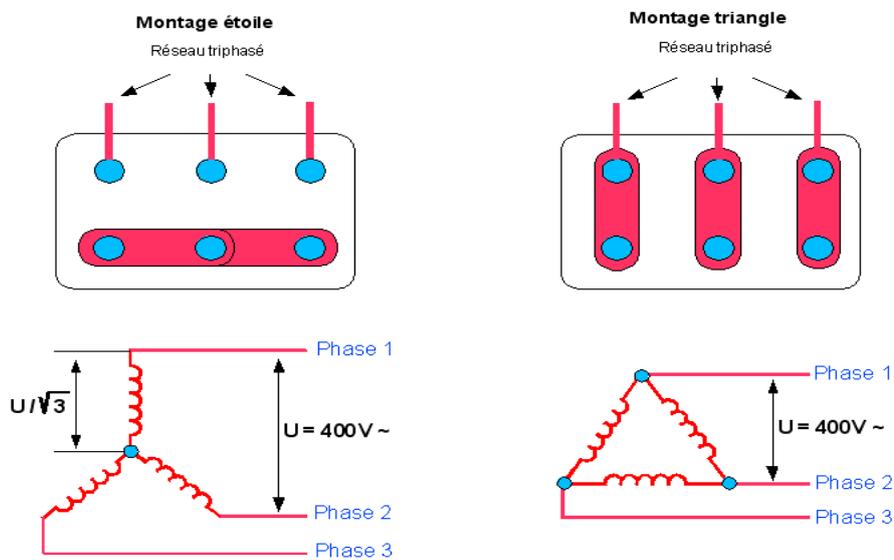
Ceci implique une réduction de couple proportionnelle au carré de la tension d'alimentation.

Diviser le courant par k en jouant sur la tension d'alimentation, c'est diviser le couple utile par k^2 .

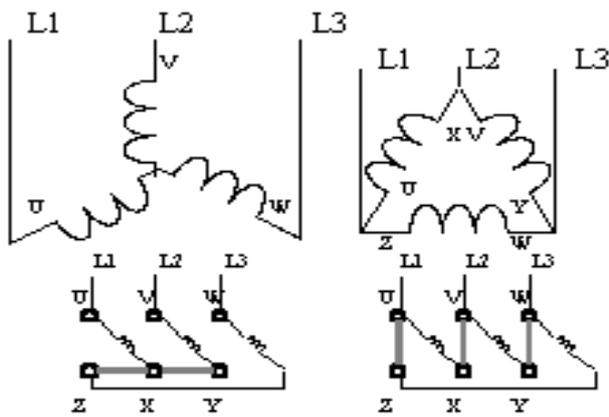
Dans ces conditions, ce type de démarrage est essentiellement réservé aux moteurs démarrant à très faible charge, voire à vide.

De nombreux procédés ont été basés sur ce principe (*insertion de résistances ou de réactances statoriques, démarrage étoile-triangle, autotransformateur...*). L'évolution des technologies est telle qu'on n'en trouve plus guère que 2 types, que nous allons comparer:

1.1. DEMARRAGE ETOILE - TRIANGLE (Y Δ) :



Attention : pour un moteur, c'est la tension la plus basse qui est la tension maximal admissible sur les enroulements ex 220 / 380 V , la tension V sur les enroulements ne peuvent pas dépasser 220 V

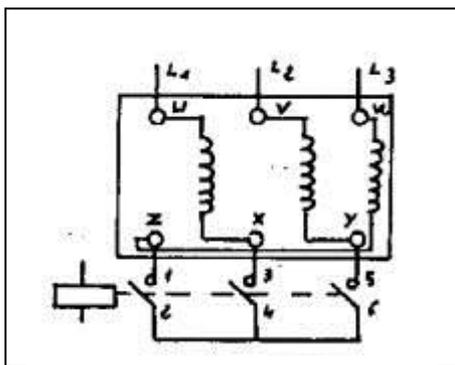


Principe

Ce procédé ne peut s'appliquer qu'aux moteurs dont toutes les extrémités d'enroulement sont sorties sur la plaque à bornes, et **dont le couplage triangle correspond à la tension nominale du réseau.**

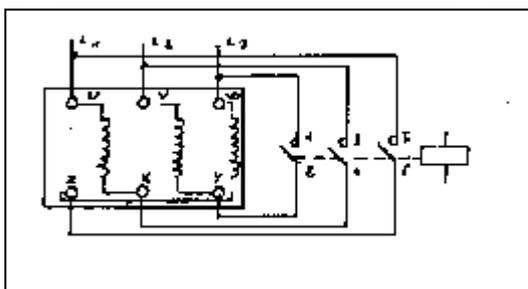
Le démarrage s'effectue en 2 temps :

* Couplage étoile



1 temps : mise sous tension et couplage étoile des enroulements.

Le moteur démarre à tension réduite



2 temps : Suppression du couplage étoile, et mise en couplage triangle Le moteur est alimenté sous pleine tension

Pour un réseau 220 V --> Moteur 220 / 380 V

Premier temps du couplage « étoile »

$$U_{\text{démarrage}} = \frac{1}{\sqrt{3}} U_{\text{pleine tension}}$$

$$C_{\text{démarrage}} = \frac{1}{3} C_{\text{pleine tension}}$$

La tension réduite dans le rapport racine de 3 qui est appliquée au moteur dans le premier temps du démarrage entraîne une réduction du tiers des grandeurs Couple et Intensité par rapport au

démarrage direct.

Ce démarrage convient aux machines démarrant à vide ou à couple résistant très faible. La valeur typique du couple de décollage C_d est la moitié du couple nominal C_n .

Second temps : au moment du changement de couplage

On observe :

Une seconde pointe de courant

Pendant toute la phase « étoile » le couple moteur reste faible et si le couple résistant est relativement élevé, la vitesse en fin de ce premier temps peut se trouver à des valeurs assez faibles. Il en résulte alors des pointes de courant et de couple importantes au moment du changement de couplage.

Des phénomènes transitoires se produisent au passage du couplage étoile au couplage triangle du fait de l'interruption de courant du à la commutation et des caractéristiques inductives des enroulements.

Conclusions

Avantages

- Appel de courant en étoile réduit au tiers de sa valeur en direct
- Faible complication d'appareillage.

Inconvénients

- Couple réduit au tiers de sa valeur en direct
- Coupure entre les positions étoile et triangle d'où apparition de phénomènes transitoires

Emploi : Machine démarrant à vide : Ventilateur...

Valeur du courant et du couple

Chaque phase voit une tension divisée par racine de 3. $C_y = \frac{C_{\Delta}}{3}$

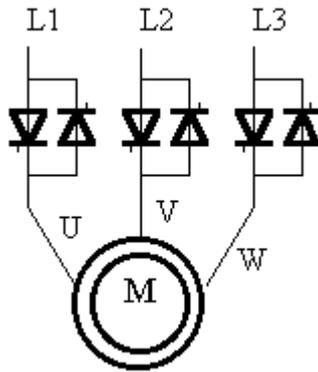
Le courant par enroulement est aussi divisé par racine de 3: $J_y = \frac{J_{\Delta}}{\sqrt{3}}$

En étoile: $I_y = J_y$ En triangle: $I_{\Delta} = J_{\Delta} \sqrt{3}$

En conclusion: $I_y = \frac{I_{\Delta}}{3}$

Le démarrage étoile - triangle divise le courant en ligne et le couple moteur dans le même rapport 3

1.2. DEMARRAGE PAR GRADATEUR DE TENSION:



L'angle d'amorçage du gradateur permet de régler *la valeur efficace de la tension d'alimentation*.
(voir cours d'alim de puissance)

Il existe des démarreurs à rampe de tension et à limitation de courant.

On a pour objectif de réduire le courant en ligne par k , soit:

$$I' = \frac{I}{k}$$

Ce dernier étant proportionnel à la tension d'alimentation, on appliquera:

$$U' = \frac{U}{k}$$

Le couple sera réduit dans le carré de ce rapport:

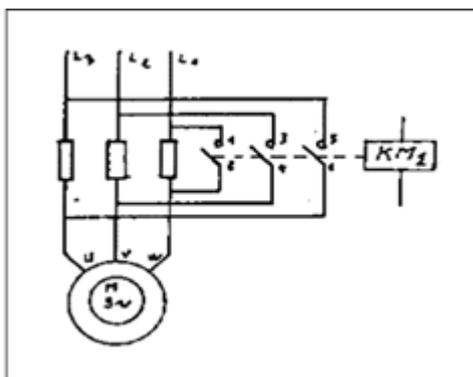
$$C' = \frac{C}{k^2}$$

2 actions par ajout de Résistances :

2.1. DÉMARRAGE A RESISTANCES STATORIQUES

Principe

C'est une mise en série temporaire d'un ou plusieurs groupes de résistances en série avec le stator



1 TEMPS : KM1 ouvert

2 TEMPS : KM1 fermé

Intensité et Couple

Intensité

La tension appliquée aux bornes du moteur ne reste pas constante pendant le temps d'accélération.

L'intensité maximale se situe lors de la mise sous tension, puis elle diminue $I_d = 4,5 I_n$

Couple

Le couple initial est relativement faible pour une pointe de courant assez importante . $C_d = 0,75 C_n$

Ce démarrage peut se faire en 2, 3, 4.. temps suivant la puissance du moteur par élimination progressives d'un ensemble de résistances statoriques branchées directement en série avec le stator.

2. 2. DÉMARRAGE A RESISTANCE ROTORIQUE:

Principe :

On utilise obligatoirement un moteur asynchrone triphasé a rotor bobiné en étoile avec sorties sur trois bagues plus coûteux et plus fragile (contacts glissants)

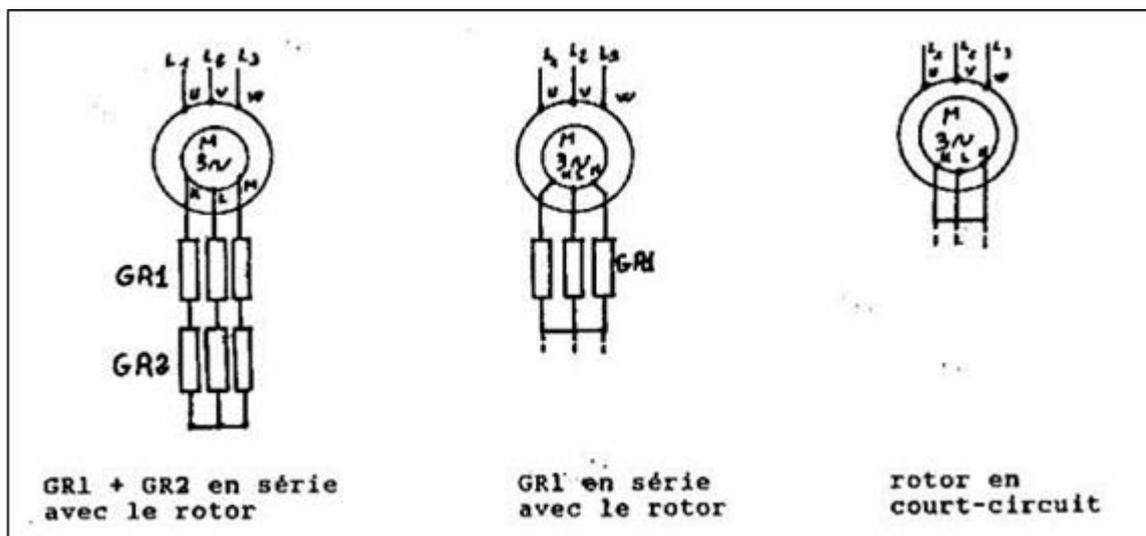
Fonctionnement :

STATOR : Pleine tension

ROTOR :

- pendant le démarrage : des groupes de résistances sont mises en série avec les bobinages rotoriques,
- puis les résistances sont court-circuitées.

Ce système permet de diminuer la pointe de courant au démarrage.



Intensité et Couple

Intensité

Le courant absorbé est sensiblement proportionnel au couple fourni ou très peu supérieur.

EX : Pour un couple de démarrage $C_d = 2,5 C_n$.

L'intensité sera sensiblement de $2 I_n$ $I_d < 2,5 I_n$

Couple

On obtient fréquemment des couples de démarrage égaux à 2,5 fois le C_n sans surintensité excessive. On peut encore réduire la surintensité en augmentant le nombre d'étapes de démarrage (nombre de groupe de résistances). $C_d < 2,5 C_n$.

Avantages

- L'appel de courant est pour un couple de démarrage donné le plus faible par rapport à tous les autres modes de démarrage
- Possibilité de choisir par construction , couple et le nombre de temps de démarrage

Inconvénients

- Nécessité d'un moteur à rotor bobiné
- Equipement plus cher

Ce type de démarrage est en voie de disparition, le meilleur choix économique moderne étant le variateur de vitesse électronique.

MOTEURS ASYNCHRONES A CAGE SPECIALE:

Source texte : <http://www.ac-poitiers.fr/cmrap/get/pdf/Eqt01.pdf>

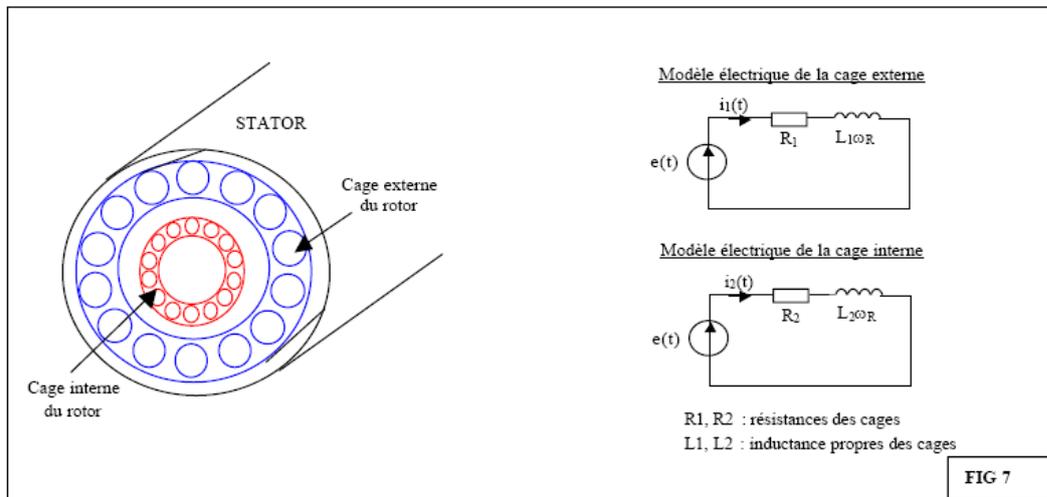


Le rotor possède deux cages coaxiales :

La cage externe, placée à la périphérie du rotor, est fabriquée dans un matériau possédant une forte résistivité (laiton, bronze). Cette cage offre une très grande résistance électrique (R_1 est grand) et présente peu de fuites magnétiques par rapport au stator (L_1 est faible) .

La cage interne, profondément noyée dans le circuit magnétique du rotor, est fabriquée dans un matériau possédant une faible résistivité (cuivre) . Cette cage est peu résistante (R_2 est faible) mais a une grande dispersion magnétique par rapport au stator (L_2 est grand).

Les deux cages sont électriquement indépendantes.



Au démarrage, la pulsation ωR des courants $i_1(t)$ et $i_2(t)$ est égale à la pulsation du réseau. Ainsi, l'impédance de la cage interne est très supérieure à l'impédance de la cage externe ; les courants qui circulent dans la cage interne sont faibles devant les courants qui circulent dans la cage externe. Par conséquent, la cage interne n'a que peu d'influence sur le fonctionnement du moteur ; il se comporte alors sensiblement comme si la cage extérieure de forte résistance existait seule (le couple est élevé : typiquement, $C_d=2.C_n$ et $C_{max}=2,5.C_n$),

En marche normale la pulsation ωR des courants $i_1(t)$ et $i_2(t)$ est faible. Ainsi, l'impédance de la cage externe est très supérieure à l'impédance de la cage interne ; les courants qui circulent dans la cage externe sont faibles devant les courants qui circulent dans la cage interne. Par conséquent, la cage externe n'a que peu d'influence sur le fonctionnement du moteur ; il se comporte alors sensiblement comme si la cage intérieure de faible résistance existait seule (les performances sont celles d'un moteur ordinaire) .

Pilotage de la vitesse de rotation des moteurs asynchrones

Le pilotage de la vitesse de rotation du moteur asynchrone est essentiel pour beaucoup d'applications.

La relation suivante permet de cerner quels sont les paramètres qui peuvent influencer la vitesse de rotation.

$$g = (n_0 - n) / n_0$$

g = glissement [%].

n_0 = vitesse du champ tournant [tr/min].

n = la vitesse de rotation de l'arbre du moteur [tr/min].

$$n = ((1 - g) \times f) / p$$

f = fréquence du réseau [Hz].

p = le nombre de paires de pôle.

On peut donc piloter la vitesse de rotation en intervenant sur :

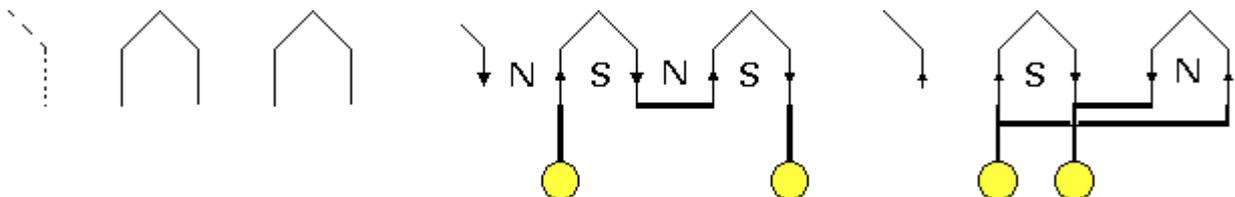
- le nombre de paires de pôle (moteur à deux vitesses par exemple),
- le glissement du moteur (moteur à bague),
- la fréquence du réseau. (onduleur)

Pilotage en modifiant le nombre de pôles

Certaines anciennes installations fonctionnent encore avec des moteurs à deux vitesses. La plupart du temps se sont des moteurs dont le rotor est composé de deux nombres différents de paires de pôles. Les enroulements sont disposés dans les encoches du stator d'une manière particulière qui en fait tout sa complexité. Les différents couplages par paire de pôles permettent d'obtenir différentes vitesses.

Exemple : Couplage d'enroulements (moteur de type Dahlander)

Ce type de moteur possède 2 bobinages distincts par phase, qui peuvent être couplés en série (4 pôles) ou en parallèle (2 pôles) et donc avoir 2 vitesses différentes



La vitesse de synchronisme varie donc dans le rapport 2 et la grande vitesse correspond au couplage parallèle

Un moteur bipolaire a une vitesse de rotation de 3 000 [tr/min], tandis qu'un quadripolaire tourne à 1 500 [tr/min] ou à 3 000 [tr/min].

Donc pour autant que l'on puisse réaliser des couplages différents sur des moteurs à deux nombres différents de paires de pôles, on obtient des vitesses différentes.

Régulation de fréquence et de tension - variateur de vitesse (Altivar)

A l'heure actuelle, le pilotage de la vitesse des moteurs asynchrones se fait électroniquement grâce à des variateurs de vitesse (combinaison d'un gradateur et d'un onduleur)

Vitesse de rotation : On peut piloter la vitesse de rotation du moteur, sans perte de puissance, **en faisant varier la fréquence (onduleur)** car la vitesse de rotation du champ tournant au niveau du stator change. $N = 60 f/p$ (en tours par minute)

Couple moteur : Pour conserver le couple moteur, il faut que la tension du moteur se modifie avec la fréquence dans **un rapport constant U/f** voir formule ci-dessous. En effet, le couple est lié à la fréquence, la tension et le courant par la formule suivante.

$$C \simeq (U/f) \times I$$

$C =$ couple moteur [Nm].

$U =$ tension du réseau [V].

$I =$ courant absorbé par le moteur [A]

Si le rapport entre la tension et la fréquence reste constant, le couple le reste aussi.

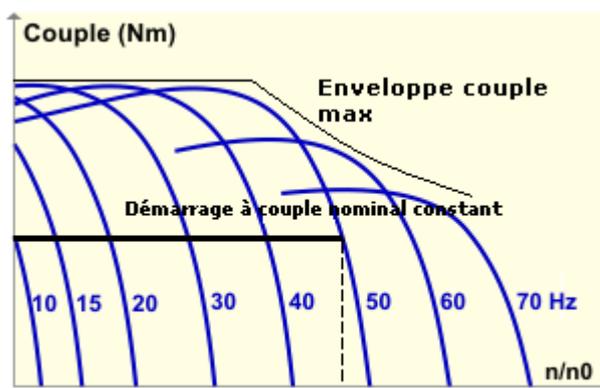


Photo d'un Altivar, Prix : +/- 200 €

Le pilotage du moteur par un variateur de fréquence et de tension montre des intérêts certains à savoir principalement :

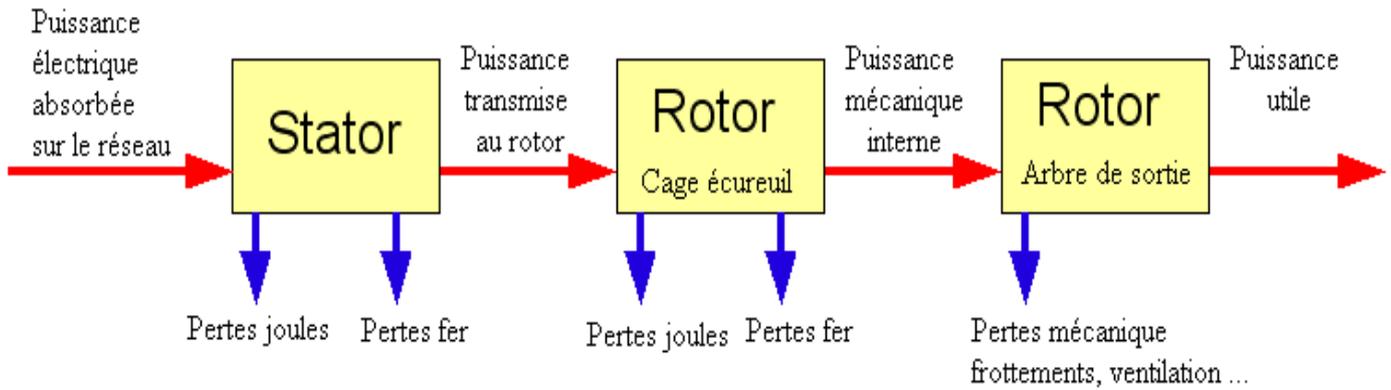
- la limitation du courant de démarrage (de l'ordre de 1,5 fois le courant nominal)
- un couple relativement constant quelle que soit la vitesse du moteur.
- Variation de vitesse constante sans chocs mécaniques
- Facile à modifier : tout est programmable

C'est l'amélioration des variateurs de vitesse (grâce aux progrès de l'électronique de puissance des années 1970 et 80 : thyristor, onduleur, gradateur) qui va permettre au moteur asynchrone de s'imposer sur les machines à courant continu utilisée anciennement.

Les autres méthodes de réglages de vitesse utilisée dans le passé sont devenues obsolètes

Puissance et rendement

Bilan des puissances



La puissance consommée sur le réseau en triphasé est

$$P = UI\sqrt{3} \cos\varphi$$

Le $\cos\varphi$ du moteur est une caractéristique indiquée sur la plaque signalétique.

		MOT. 3 ~ LS 100 L		22 kg		
		N° 8945/79		T		
Code :						
DIM 1502 MADE IN FRANCE DE NDE	IP 55	I cl. F	40°C	S1	%	c/h
		Hz	min ⁻¹	kW	cos φ	A
	Δ 380	50	1415	3	0,83	7,1
	Δ 400	50	1420	3	0,78	7,2
	Δ 415	50	1430	3	0,74	7,3
				g	h	
MOTEURS LEROY-SOMER						

Exercice Plaque signalétique



Relever les informations portées sur la plaque signalétique :

Puissance utile, $P_u =$ _____

Vitesse de rotation, $N =$ _____

rendement, $\eta =$ _____

coefficient de déphasage, $\cos \varphi =$ _____

Calculer la fréquence de synchronisme N_s :

Calculer la valeur du glissement g :

Calculer de deux façons différentes, la puissance P_a absorbée par le moteur :

Un moteur asynchrone possédant deux pôles est alimenté en courant alternatif 50 Hz

Calculer la fréquence de synchronisme N_s :

Calculer sa vitesse de rotation N si le glissement est de 5% :

Bibliographie

Physique Tome 2, Electricité et magnétisme, de Harris Benson, aux éditions de Boeck

Physique, de Eugène Hecht aux éditions de Boeck

Electrotechnique, de Théodore Wildi et Gilbert Sybille, aux éditions de Boeck

Web-o-graphie

Moteur synchrones : <http://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=11531>

Vairateur de vitesse : <http://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=11535>

HEFF

Cours électricité et mécanique appliquées

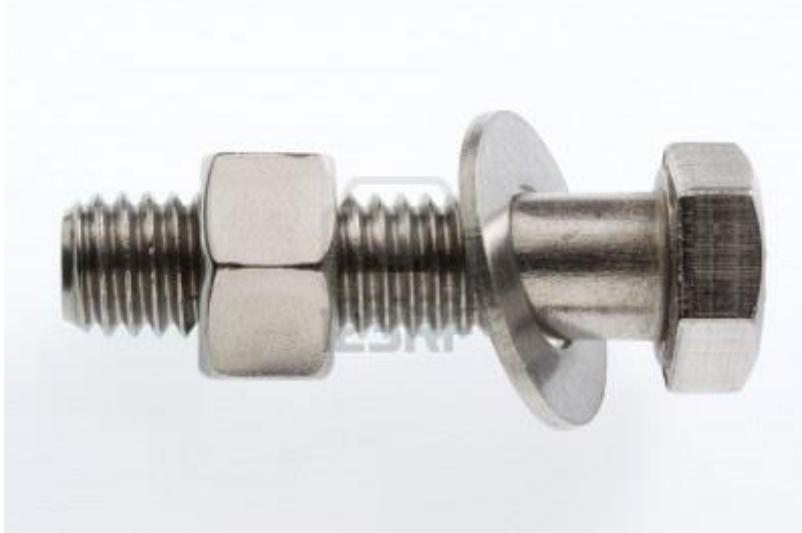
Partie mécanique

G. Barmarin

2012-2013

Première partie : les assemblages

Écrou et boulons



Un boulon constitué d'une vis avec un écrou, muni d'une rondelle

Un boulon est un organe d'assemblage constitué d'une vis à filetage uniforme et extrémité plate (ou tige filetée), et d'un écrou (et éventuellement d'une rondelle). Dans le langage commun, le boulon désigne toutefois fréquemment la seule partie vis, le terme de vis étant alors réservé aux seules vis à extrémité effilée.



Un ensemble de vis

Un boulon crée une liaison complète, rigide et démontable, entre les pièces qu'il traverse et presse l'une contre l'autre. En fait, les boulons (et les vis à métaux) agissent comme des ressorts très raides dont l'élasticité permet de maintenir le serrage des pièces malgré l'influence de facteurs extérieurs tels que des actions mécaniques, des vibrations ou encore des élévations de température. Une ou plusieurs rondelles placées de part et d'autre des pièces permettent de mieux répartir l'effort de compression, de reprendre le matage éventuel des surfaces¹ et/ou de protéger le substrat de déformations non désirées. Un écrou supplémentaire (contre-écrou) peut venir freiner l'assemblage et éviter qu'il se desserre. Le nom de boulon intègre par extension ces équipements complémentaires.

Le boulon constitue un dispositif d'assemblage précontraint. En effet, la traction mécanique maintenue dans la tige provoque un frottement qui empêche la rotation de la tête de la vis et celle de l'écrou par rapport à la

pièce fixée. Dès lors que cette traction disparaît (aplatissement de la surface de contact en +/- 15 min, fluage en +/- 10 ans), l'assemblage périt.

Divers dispositifs permettent d'éviter le desserrage de l'écrou, par arrêt mécanique (rondelles à rabattre, perçage et passage d'un fil en aviation, goupillage, écrous à créneaux), ou par effet du serrage notamment les rondelles freins fendues et élastiques (« Grower » ou « W »), ondulées, crantées (« éventail » ou « AZ »), par freinage de l'écrou lui-même (écrous Nylstop, à collerette); la tendance moderne étant au collage par des adhésifs anaérobies, démontables par chauffage ou force brute.

Tout "boulon" (assemblage de la vis + l'écrou) correspond à des caractéristiques dimensionnelles normalisées définies comme suit :

- Pour la vis (partie male) : son diamètre nominal c'est à dire le diamètre au sommet du filet, et le pas du filetage.
- Pour d'écrou (partie femelle) : son diamètre nominal c'est à dire le diamètre au "fond de filet", et son pas également.

Le pas étant la distance entre 2 sommets (ou 2 fonds) du filetage, souvent repéré " P " sur les schémas.

Caractérisation complète d'un boulon

- caractéristiques de la tige :
 - forme de tête : hexagonale, carrée, cylindrique, fraisée, six pans creux, [Torx](#), XZN, diamand, halfen...
 - aménagement de la tête, lié au système de manœuvre : fente, empreinte, etc. (pour tournevis plat ou cruciforme, clef à 6 pans, Torx,...)
 - longueur de tige et longueur filetée (définies par les normes),
- caractéristiques de l'écrou :
 - forme (hexagonale par défaut),
 - hauteur.
- caractéristiques communes aux deux :
 - diamètre nominal du filetage,
 - profil du filet et pas de vis,
 - matière (acier E36, E24, 35CD4... Inox, Aluminium, Platine...)
 - classe de matériaux (critères de résistance : classe 4.6, 5.8, 6.8, 8.8, 10.9, 12.9, A70...).
 - Le 1^{er} chiffre correspond au dixième de la valeur de la limite de rupture à la traction, exprimé en daN/mm².
 - Le produit du 1^{er} par le 2^e chiffre de la classe donne approximativement la limite élastique en daN/mm².
 - revêtement -- seulement pour les boulons en acier -- (galvanisé à chaud au trempé, électrozingué, bichromaté, brut...)

Le revêtement et la matière du boulon jouent un rôle très important du fait des couples électrochimiques entrant en jeu.

Filetage

Un filet est une structure hélicoïdale utilisée pour la transformation rotation/translation. Cette structure peut se trouver enroulée autour d'un cylindre plein (tige filetée, par exemple une vis) ou creux (trou taraudé, par exemple un écrou). Le pas de vis mesure la distance entre une forme de la structure et sa plus proche répétition trouvée par translation selon l'axe du cylindre.

On peut également dire que le pas de vis, correspond à la distance relative parcourue en translation par une vis par rapport à son écrou lors d'un tour complet ou que le pas de vis mesure la distance entre une forme de la structure et sa plus proche répétition trouvée par translation selon l'axe du cylindre.

Exemple : une vis avec un pas de 5 (car le "pas" s'exprime en mm) avancera de 5 mm lors de la rotation d'un tour pour un pas métrique.

Dans un système vis-écrou, selon la valeur du pas de vis, le diamètre du cylindre et le coefficient de frottement des matériaux utilisés,

- soit la rotation seule peut entraîner la translation (vis d'assemblage)
- soit la translation seule peut entraîner la rotation (manche de tournevis « automatique »)
- soit le système est réversible

Le choix du pas de vis (ainsi que des autres paramètres) dépend donc de l'utilisation envisagée. Le plus grand nombre des applications se trouve dans la première catégorie (la rotation produit la translation, de manière irréversible)

Le filetage peut se rencontrer également sur des cônes ou tronc de cône. Ils sont généralement employés que dans une zone d'engagement d'une pièce filetée sur cylindre (vis à bois, à tôle.)

Un pas de vis s'obtient par usinage d'un filet, soit sur la surface externe (filetage externe) d'un cylindre ou sur la face interne d'un alésage (taraudage). Les moyens utilisés sont :

- la filière manuelle ou électrique;
- le taraud
- le tour (machine-outil), fonction filetage externe ou interne à l'outil;

Filetage métrique (iso)

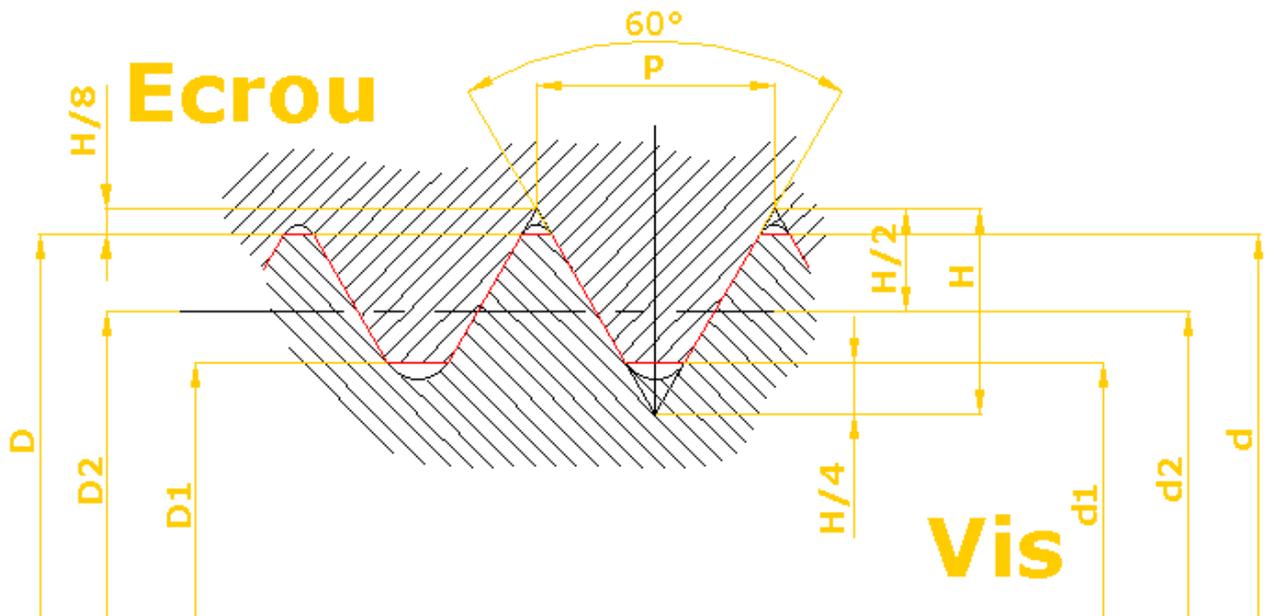
Le filetage métrique (ou filetage métrique ISO, filetage isométrique, filetage triangulaire) est un filetage qui part d'un triangle équilatéral.

Dans la désignation, le symbole du filetage métrique est M.

Il y a plusieurs types de pas: un pas gros et un pas fin.

L'indication du pas dans la désignation, pour le pas gros, est facultative : si le pas n'est pas indiqué, il s'agit d'un pas gros. La désignation pour un pas fin est la lettre S.

Ce type de filetage est le plus utilisé, c'est le plus facile à fabriquer. C'est un très bon compromis.



$d = D = \text{diamètre nominal}$	$P = \text{Pas}$	$H = 0,866P$
$d1 = D1 = d - 1,0825P$	$d2 = D2 = d - 0,6495P$	$d3 = d - 1,2268P$

Filetage métrique à pas standard (normal)

Diam. nominal	Pas	Diamètre sur flancs	Diamètre du noyau de la vis	Diamètre intérieur de l'écrou	Section du noyau
$d = D$	P	$d_2 = D_2$	d_3	D_1	
1	0,25	0,838	0,693	0,729	0,377
(1,1)	0,25	0,938	0,794	0,829	0,50
1,2	0,25	1,038	0,894	0,929	0,63
1,4	0,3	1,205	1,032	1,075	0,84

1,6	0,35	1,373	1,170	1,221	1,08
1,8	0,35				
2	0,4	1,74	1,509	1,567	1,79
2,2	0,45				
2,5	0,45	2,208	1,948	2,013	2,98
3	0,5	2,675	2,386	2,459	4,47
3,5	0,6				
4	0,7	3,545	3,141	3,242	7,75
(4,5)	0,75				
5	0,8	4,48	4,018	4,134	12,7
6	1	5,35	4,77	4,918	17,9
(7)	1				
8	1,25	7,188	6,466	6,647	32,9
10	1,5	9,026	8,159	8,376	52,3
12	1,75	10,863	9,853	10,106	76,2
14	2	12,701	11,547	11,835	105
16	2	14,701	13,547	13,835	144
18	2,5	16,376	14,934	15,294	175
20	2,5	18,376	16,934	17,294	225
22	2,5	20,376	18,934	19,294	281
24	3	22,051	20,319	20,752	324
27	3	25,051	23,319	23,752	427
30	3,5	27,727	25,706	26,211	519
33	3,5	30,727	28,706	29,211	647
36	4	33,402	31,093	31,67	759

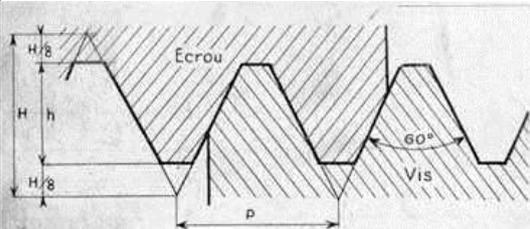
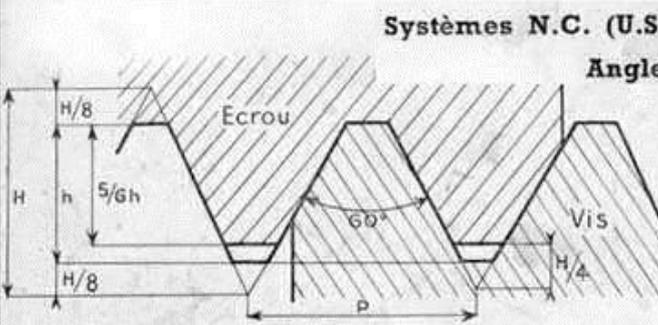
39	4	36,402	33,093	34,67	913
42	4,5	39,077	36,479	37,129	1050
45	4,5	42,077	39,479	40,129	1220
48	5	44,753	41,867	42,588	1380
52	5	48,753	45,867	46,588	1650
56	5,5	52,428	49,253	50,047	1910
60	5,5	56,428	53,253	54,047	2230
64	6	60,103	56,639	57,505	2520

L'emploi des valeurs en **gras** est recommandé. Il faut éviter l'emploi des valeurs en non gras. Et les valeurs entre parenthèses ne devraient pas être utilisées.

Comparaison des autres types de filetage avec le filetage métrique :

Il existe plusieurs normes de filetages :

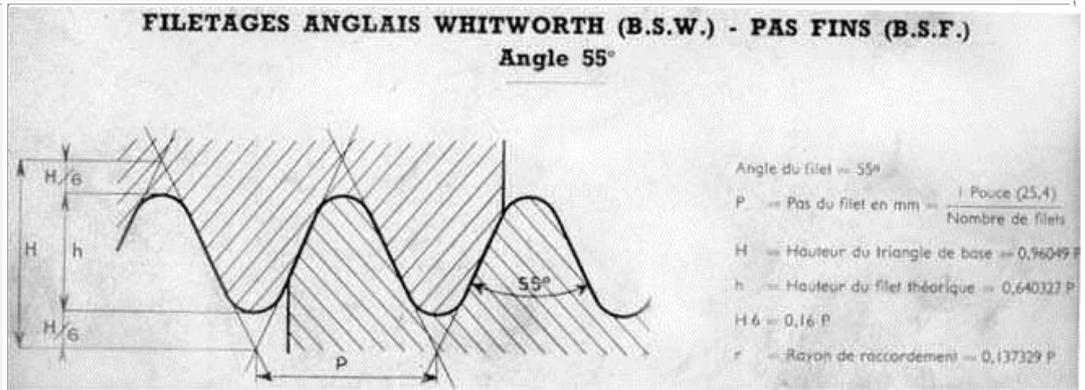
Filetages de pièces mécaniques :

<p>Filetage Métrique SI (Système International) :</p> <p>Diamètres et pas en millimètres.</p>		<p>FILETAGES MÉTRIQUES - PAS SI</p> <p>Angle 60°</p> <p>P = Pas du filet en mm</p> <p>H = Hauteur du triangle de base = 0,866025 P</p> <p>h = Hauteur du filet théorique = 0,649519 P</p> <p>H/8 = 0,18253 P</p>
<p>Filetages US</p> <p>U.N.C. et U.N.F. : Diamètres en Inches (pouces), pas en nombres de filets par pouce .</p>		<p>Systèmes N.C. (U.S.S.) - N.F. (S.A.E.)</p> <p>Angle 60°</p> <p>Angle du filet = 60°</p> <p>P = Pas du filet en mm = $\frac{1 \text{ Pouce (25,4)}}{\text{Nombre de filets}}$</p> <p>H = Hauteur du triangle de base = 0,866025 P</p> <p>h = Hauteur du filet théorique = 0,649519 P</p> <p>H/8 = 0,108253 P</p>

Filetages Whitworth (GB)

B.S.W. & B.S.F. : la particularité est le rayon (arrondi) au sommet des filets .

Diamètres en inches, pas en nombre de filets par pouce.



Filetages de raccords & tubes

C'est ici que la situation se corse :

Il faut tout d'abord distinguer si l'on a affaire à un filetage conique ou bien cylindrique .

Les 2 normes BSP & NPT existent dans les 2 "formes" cylindriques et coniques (le NPT cylindrique est aussi appelé **NPS** pour National Pipe Straight).

Chacune des normes BSP (GB) et NPT (USA) a ses **propres** caractéristiques, notamment dimensionnelles :

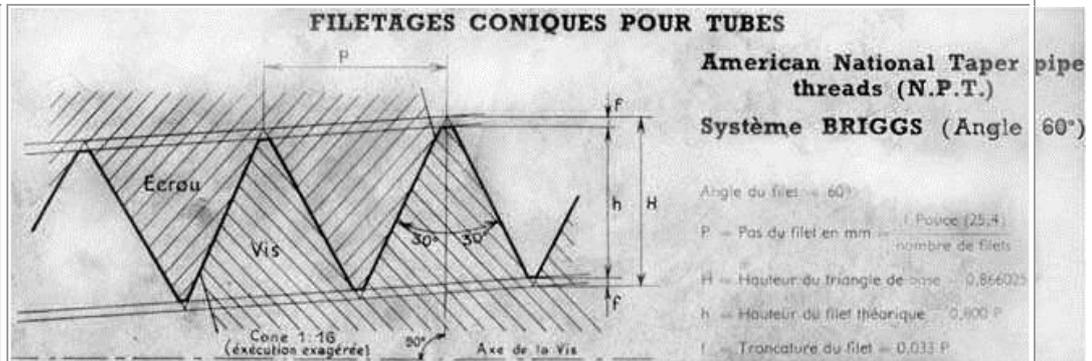
Par exemple du 1/2 BSP conique mesure 20.956 mm (nominal), et non pas 12.7 mm comme on pourrait le calculer "théoriquement".

Du 1/2 NPT est lui égal à 21.66 mm et ainsi de suite.

A noter également, que le BSP est identique au "pas du GAZ" employé en plomberie, par exemple du 1/2 BSP = 1/2 GAZ = 15x21.

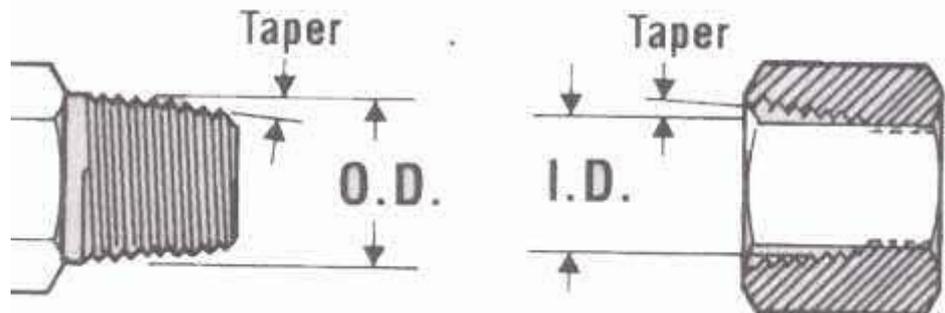
Raccords **NPT** (ou Briggs) et **NPTF** : National Pipe Taper Fine (angle du filet 60°)

L'étanchéité est assurée par la liaison filet sur filet (emploi de ruban de téflon ou produit d'étanchéité chimique type Loctite recommandé), filetage à la norme NPT , dimensions nominales (Outer & Inner Diameter) en **pouces NPT et fractions de pouce NPT**, le pas en nombre de filets par pouce.



NPTF

FILETAGE CONIQUE



Diametres			Nbre de Filets/pouce	Pas en mm	Diam de perçage
Pouces	D en mm	d en mm			
1/8	10.47	9.27	27	0.941	8.4
1/4	13.84	12.16	18	1.411	11.1
3/8	17.32	15.64	18	1.411	14.3
1/2	21.66	19.47	14	1.814	17.9
3/4	27	24.81	14	1.814	23
1	33.75	31	11.5	2.207	28.9
1" 1/4	42.51	39.76	11.5	2.207	37.7

Avec sur le schéma OD et ID = diamètre moyens, dans le tableau D et d = diamètres le plus grand et le plus petit du cône .

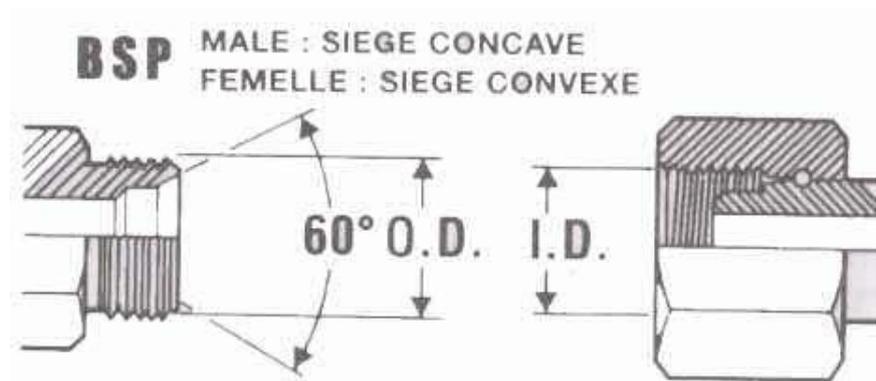
Voici quelques dimensions (les plus courantes) de filetages **BSP** (ou GAZ) Coniques :

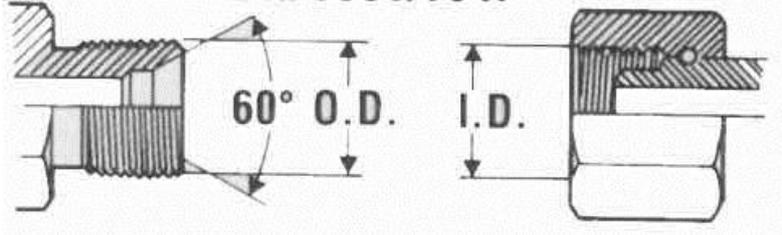
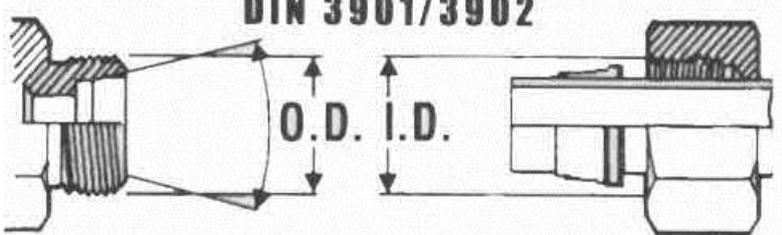
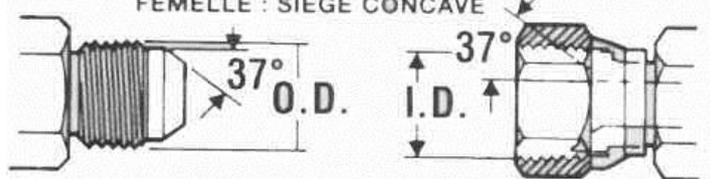
Diametre Nominal		Tube en mm	Nbre de Filets/pouce	Pas en mm	Diam a flanc de filet	Diam de perçage
Pouces	mm					
1/8	9.729	5x10	28	0.907	9.147	8.7
1/4	13.158	8x13	19	1.337	12.301	11.75
3/8	16.663	12x17	19	1.337	15.806	15.25
1/2	20.956	15x21	14	1.814	19.794	19
5/8	22.912	16x23	14	1.814	21.750	21
3/4	26.442	21x27	14	1.814	25.280	24.5
7/8	30.202	24x31	14	1.814	29.040	28.25
1	33.250	26x34	11	2.309	31.770	30.5

BSP (ou GAZ) Conique :

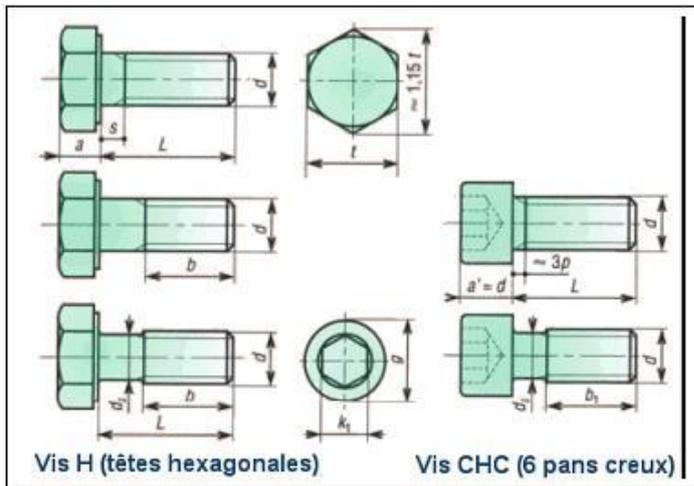
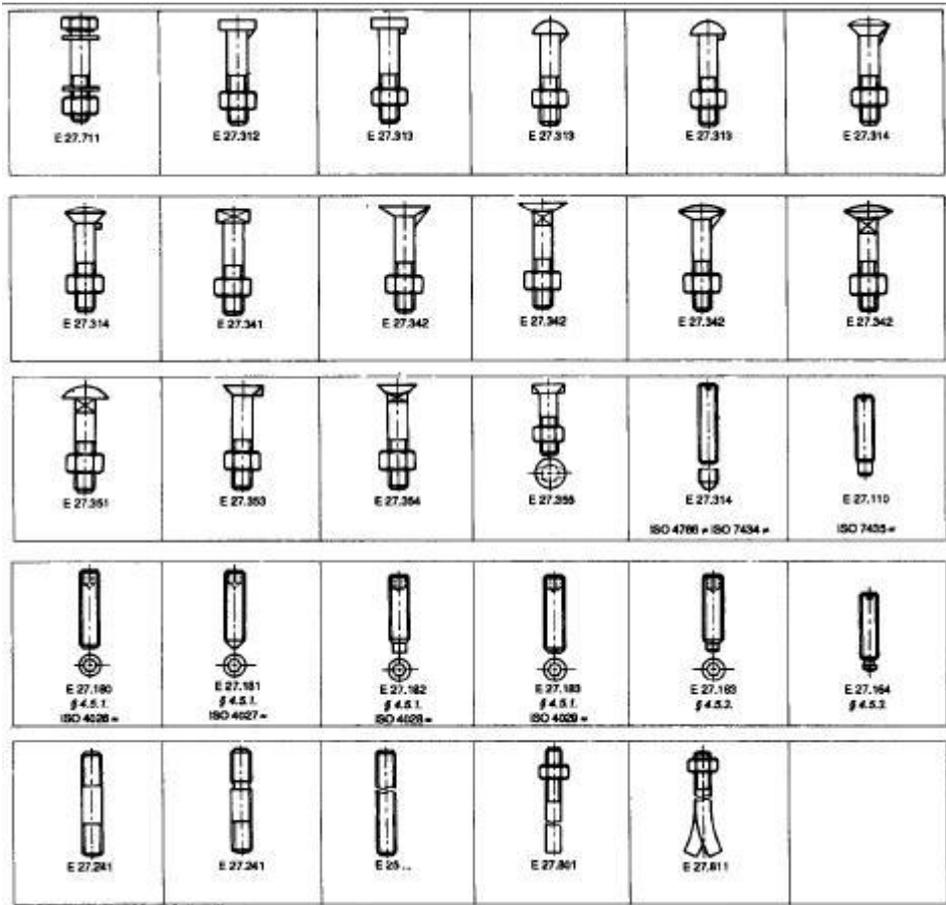
Raccord **BSP cylindrique** (angle du filet 55°):

L'étanchéité est faite par la liaison cône dans cône (60°), filetage cylindrique norme BSP (ou GAZ), **dimensions en Pouces BSP et fractions de pouces BSP**, le pas en nombre de filets par pouce.



<p>Raccord Métrique /DIN</p> <p>Étanchéité par liaison cône / cône, filetage norme SI / métrique, dimensions en millimètres.</p>	<p style="text-align: center;">DIN 7631/7647</p>  <p style="text-align: center;">DIN 3901/3902</p> 
<p>Raccord JIC</p> <p>Étanchéité cône / cône (37°), filetage cylindrique norme UNF</p>	<p style="text-align: center;">JIC/SAE 37/UNF DROIT</p> <p style="text-align: center;">MALE : SIEGE CONVEXE FEMELLE : SIEGE CONCAVE</p> 

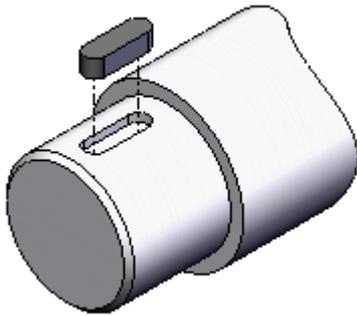
On ne détaillera pas ici les différentes formes de "têtes" qui sont elles aussi normalisées, les plus courantes étant les têtes H (Hexagonales) et les Chc (6 pans creux).



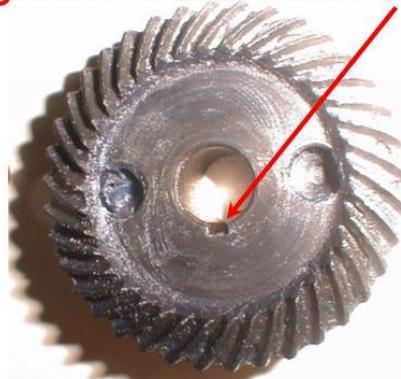
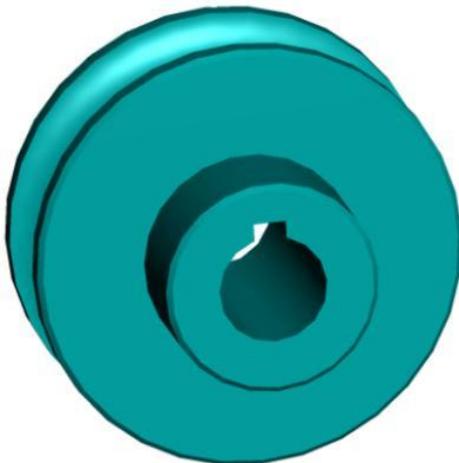
Les clavettes

En mécanique, une clavette (étymologiquement une petite clé) est une pièce qui a pour fonction de lier en rotation deux pièces (liaison de moyeux). Elle est dimensionnée pour se rompre par cisaillement lorsque le couple transmis est trop important.

Les **Clavettes** sont des pièces de liaison démontable.



Pignon avec rainure

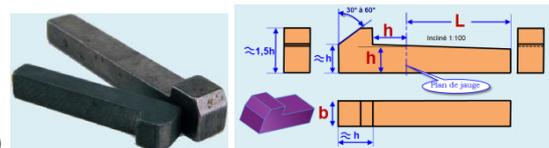


La rainure traverse tout le pignon

Il existe cinq grandes familles de clavettes :



clavettes disques

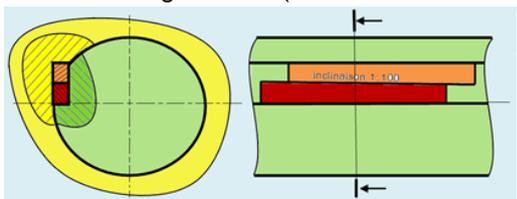


clavettes inclinées (à encastrer, à chasser ou à talon)

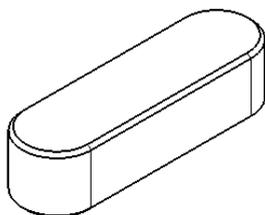


Clavettes parallèles

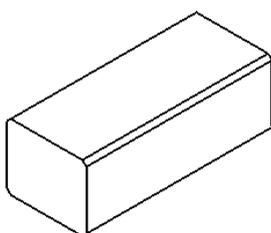
Clavettes tangentielles (combinaison de deux clavettes inclinées)



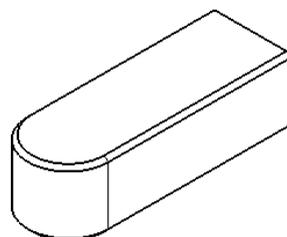
Elles sont utilisées lorsque le diamètre d de l'arbre est proche de la longueur l de la clavette ($l < 1,5d$). Il existe trois formes de clavettes parallèles :



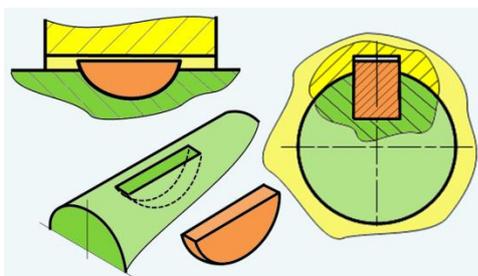
Clavette de type A



Clavette de type B



Clavette de type C



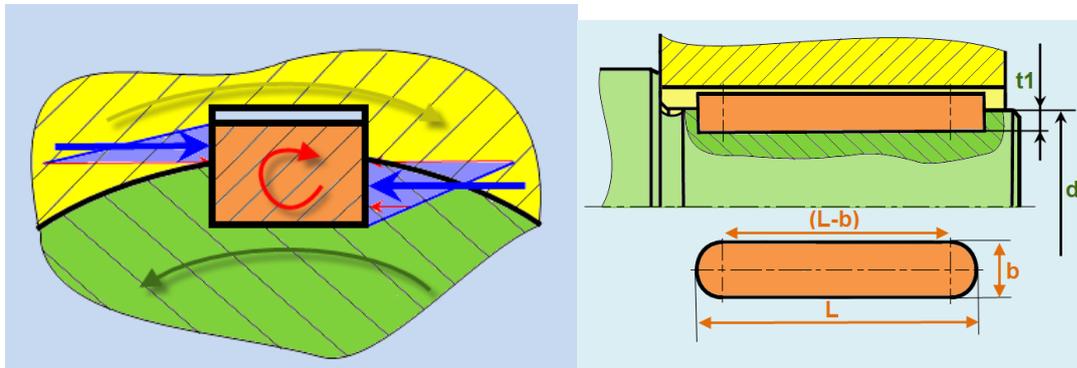
Dimensionnement

Une clavette se dimensionne selon deux critères :

cisaillement

matage

Le critère le plus contraignant sera retenu pour déterminer les dimensions de la clavette.



Cisaillement de la clavette

$$p = \frac{2 C}{d (L-b)(h-t_1)}$$

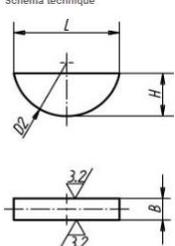
$$L = \frac{2 C}{d p_{adm}(h-t_1)} + b$$

Les pressions admissibles sur les flancs des clavette (en MPA)

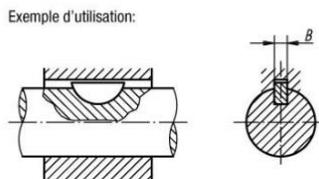
Type de montage	Mauvaise	Moyenne	Exellente
Glissant sous charge	3 à 10	5 à 15	10 à 20
Glissant sans charge	15 à 30	20 à 40	30 à 50
Fixe	40 à 70	60 à 100	80 à 150

Exemple de norme pour une clavette disque :

Schéma technique



Exemple d'utilisation:



largeur b h9	Hauteur h h12	L~	d2	Fraise x largeur		d1	
				ø h11	b e8	≥ ø d'axe	≤
1,5	2,6	6,76	7	7,5	1,5	4	6
2	2,6	6,76	7	7,5	2	6	8
2	3,7	9,66	10	10,5	2	6	8
2	5	12,65	13	13,5	2	6	8
2,5	3,7	9,66	10	10,5	2,5	8	10
3	3,7	9,66	10	10,5	3	8	10
3	5	12,65	13	13,5	3	8	10
3	6,5	15,72	16	16,5	3	8	10
3	7,5	18,57	19	19,5	3	8	10
4	5	12,65	13	13,5	4	10	12
4	6,5	15,72	16	16,5	4	10	12
4	7,5	18,57	19	19,5	4	10	12
4	9	21,63	22	22,5	4	10	12
5	6,5	15,72	16	16,5	5	12	17
5	7,5	18,57	19	19,5	5	12	17
5	9	21,63	22	22,5	5	12	17
5	10	24,49	25	25,5	5	12	17
6	9	21,63	22	22,5	6	17	22
6	10	24,49	25	25,5	6	17	22
6	11	27,35	28	28,5	6	17	22
8	11	27,35	28	28,5	8	22	30
8	13	31,43	32	32,5	8	22	30
10	13	31,43	32	32,5	10	30	38
10	16	43,08	45	45,5	10	30	38

On voit sur cette documentation, que pour un arbre de diamètre 30, elle conseille d'utiliser une clavette disque de largeur 8, d'une hauteur h de 11 ou 13 mm.

Le diamètre de la fraise de taillage est de 32,5 mm, pour une clavette de diamètre 32 (on ne représentera pas ce jeu).

La documentation n'indique pas de quelle profondeur l'on doit enfoncer la clavette dans l'arbre.

Les Paliers

Les **paliers** sont des organes utilisés en construction mécanique pour supporter et guider, en rotation, des arbres de transmission.

Suivant l'usage désiré, ces paliers peuvent être :

- *lisses* où les arbres qui reposent sur des *coussinets* sont soumis au *frottement de glissement* entre les surfaces en contact.
- *à roulement* où le contact s'effectue par l'intermédiaire de *billes* ou de *rouleaux* contenus dans des cages. On a là un phénomène de *frottement de roulement* qui permet une plus grande charge sur les paliers et une plus grande vitesse de rotation.

Les paliers lisses sont classés suivant la direction de l'arbre et le sens de la charge auxquels ils sont soumis.

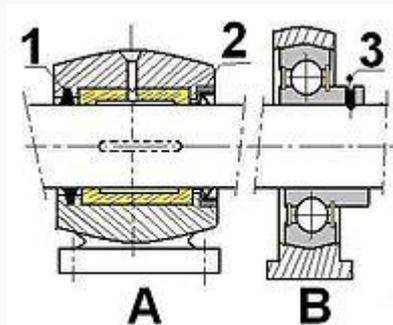
Chaque type de palier peut se différencier par un type de graissage particulier et adapté à l'emploi.

- discontinu à huile perdue,
- continu avec graisseur à mèche,
- continue avec graisseur sous pression (ressort),
- par bague trempant dans un bain d'huile,
- par huile ou graisse sous pression.

L'étanchéité aux poussières et aux fuites de lubrifiant est assurée par des joints mis de chaque côté des paliers. Les joints peuvent être montés sur l'arbre ou plus généralement sur les paliers dans des gorges alésées spécialement. Autrefois, ces joints étaient en feutre placés dans des gorges aux dimensions très précises, donc onéreuses à réaliser, de plus hors utilisation, ces joints séchaient et perdaient leur pouvoir d'étanchéité. Ces joints feutres furent remplacés par des joints et principalement par des joints à lèvres en matière synthétique. Le montage de ce matériau est plus aisé et moins coûteux depuis l'utilisation des colles de scellement qui réduit la tolérance de précision des alésages.

Pour les usages comportant de fortes charges ou nécessitant des vitesses élevées ou une grande précision, on utilise des paliers fluides, à l'huile ou à gaz. Les paliers magnétiques, dans lesquels la sustentation relève de forces électromagnétiques, permettent des vitesses de rotation très élevées (50 000 tr/min).

Paliers porteurs

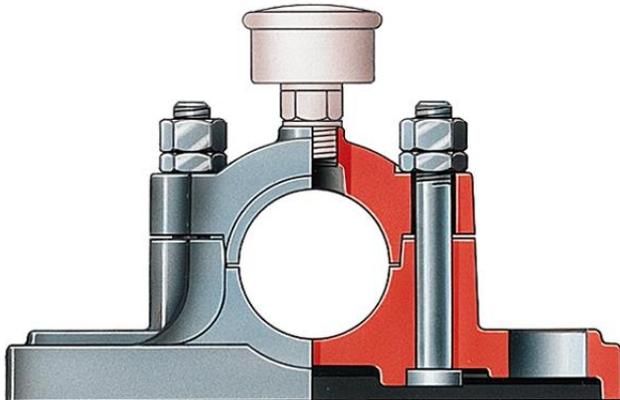


Paliers porteurs. 1=joint feutre, 2=Joint à lèvres, 3=vis pointeau

C'est le palier le plus simple qui peut être composé :

- D'un boîtier en fonte et d'un coussinet en une seule pièce. L'arbre se montant dans le sens axial convient pour de petites mécaniques facilement démontables.
- D'un boîtier muni d'un couvercle (fig. A) et d'un coussinet en deux parties s'ajustant dans le palier. Ce montage dans le sens radial rend l'entretien plus aisé et donne de meilleures conditions de travail.

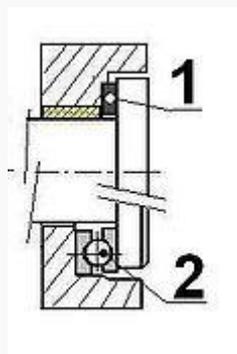
- D'un boîtier et d'un coussinet usinés en forme de *rotule*. Ce palier articulé permet un alignement plus précis de l'arbre sur les paliers qui le soutiennent. Il existe des paliers munis de roulements (fig. B) montés sur rotule qui permettent un défaut d'alignement de 3° et dont la bague intérieure est rendue solidaire de l'arbre par une vis-pointeau (rep.3).



Palier lisse

Palier à rotule

Paliers de butée



Palier butée; 1=contre-grain ,2=butée à billes

Ces paliers doivent assurer le maintien de l'arbre dans le sens axial et éviter tout déplacement de long de son axe. Le type de butée varie selon les efforts et les conditions de marche du système :

- Arbre muni d'une collerette taillée dans la masse et s'appuyant sur une face interne du palier et un contre-grain lubrifié,
- Arbre muni d'une collerette rapportée en une ou deux parties dans une gorge et s'appuyant sur un contre-grain ; pour les gros efforts axiaux,

- Le *contre-grain* est en acier traité et peut être muni de gorges pour créer un *film d'huile* qui facilite le *frottement de glissement*.
- Pour les vitesses de rotations élevées et gros efforts, la butée peut être à billes.
- Pour les efforts peu importants, l'arbre peut être simplement équipé d'un anneau élastique ou *circlip*.

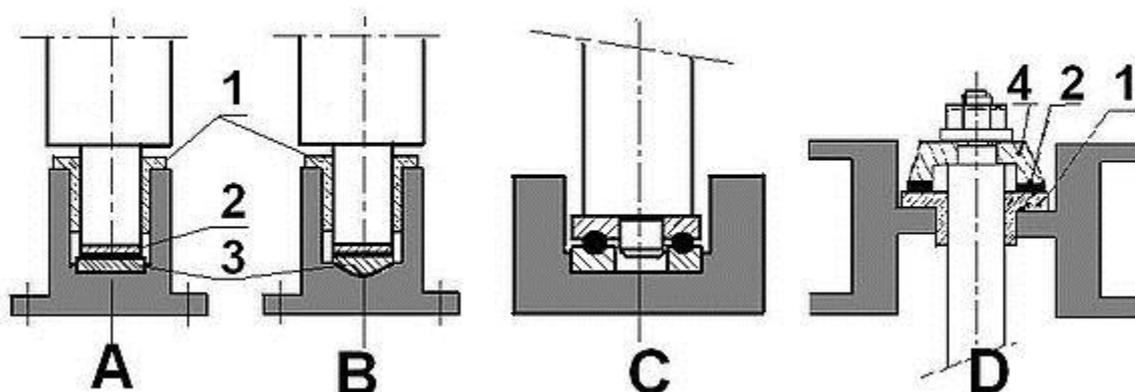
Crapaudines

Une crapaudine est une pièce de métal constituée par un palier de butée destiné à recevoir l'extrémité du pivot d'un arbre vertical et un palier de guidage destiné à absorber les efforts radiaux.

On parle parfois de « palier vertical à charge axiale ». En effet, le but de la crapaudine est bien de permettre la rotation d'un arbre dont la charge est dans le prolongement de son axe. Quand cet arbre est horizontal, on parle de palier.

La crapaudine assure le maintien axial de l'arbre ou du pivot monté verticalement. Les crapaudines sont montées selon deux orientations :

- *En bas*, cas le plus fréquent, le pivot repose dans un boîtier fixé au sol et muni d'une butée (grain et contre-grain, coussinet) ;
- *En haut*, l'arbre est suspendu à sa partie supérieure dans un boîtier appelé *crapaudine de Mitchell*. Sur l'arbre est fixé un *collet* qui pivote sur un grain et un coussinet qui assure le maintien radial.



Crapaudines : A=grain plat, B=grain sphérique, C=Butée à billes, D=crapaudine de Mitchell. 1=coussinet, 2=contre-grain, 3=grain, 4=collet

Les crapaudines peuvent être disposées :

- à la partie inférieure de l'arbre et c'est l'extrémité qui repose sur la butée (fig. A, B et C), le tout incorporé dans une chape.

- à la partie supérieure, l'arbre étant soutenu par un collet (fig. D, rep. 4) reposant sur une butée, le tout incorporé dans une chape.

Fig. A : dans le cas de charge moyenne et pour des diamètres inférieurs à 70 mm, l'arbre est guidé par un coussinet en bronze (1) et l'extrémité repose sur un contre-grain (2) qui pivote sur le grain (3) solidaire du palier. Dans certains cas le contre-grain peut être remplacé par un traitement thermique de l'extrémité du pivot (cémenté-trempé).

Fig. B : même montage que le cas précédent à la différence que le grain est sphérique pour assurer un meilleur centrage dans le palier.

Fig. C : le pivot est simplement appuyé sur une butée à bille centrée dans le palier. Ce dispositif, moins onéreux que les cas précédents, permet en plus de supporter de grosses charges axiales avec une lubrification plus simple.

Fig. D : la crapaudine de Mitchell est utilisée dans le cas de charges importantes ou pour des questions de montage, il est impossible de placer une butée dans la partie inférieure. L'arbre, guidé en translation par un coussinet (1), est soutenu par un collet (4) solidaire de l'arbre. Ce collet est muni d'un grain (2) qui pivote sur la collerette du coussinet. Ce grain peut être remplacé par une butée à billes.

Généralement la lubrification est assurée par bain d'huile, les coussinets sont en bronze autolubrifiants.

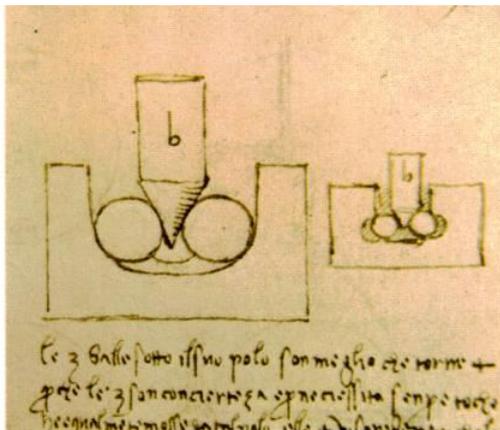
La crapaudine est présente, depuis la plus haute antiquité, comme palier d'articulation des portes ou des grilles. Son emploi est plutôt indiqué pour les lourdes portes des forteresses, qui ne pourraient être soutenues par un simple gond fiché dans le mur.

On trouve des traces de scellement de crapaudines dans certaines entrées de riches maisons romaines comme à Pompéi.

Léonard de Vinci a également étudié le problème en dessinant une crapaudine munie d'une butée à bille à la fin du XVe siècle.

Aujourd'hui, les crapaudines sont toujours utilisées, dans l'architecture traditionnelle, pour l'articulation des portillons et portiques de propriétés.

Dans la mécanique, elle trouve un usage pour l'articulation des potences ou des chèvres verticales de levage de charges.



Crapaudine de Léonard de Vinci (Codex Madrid I, f.101v)

Coussinets

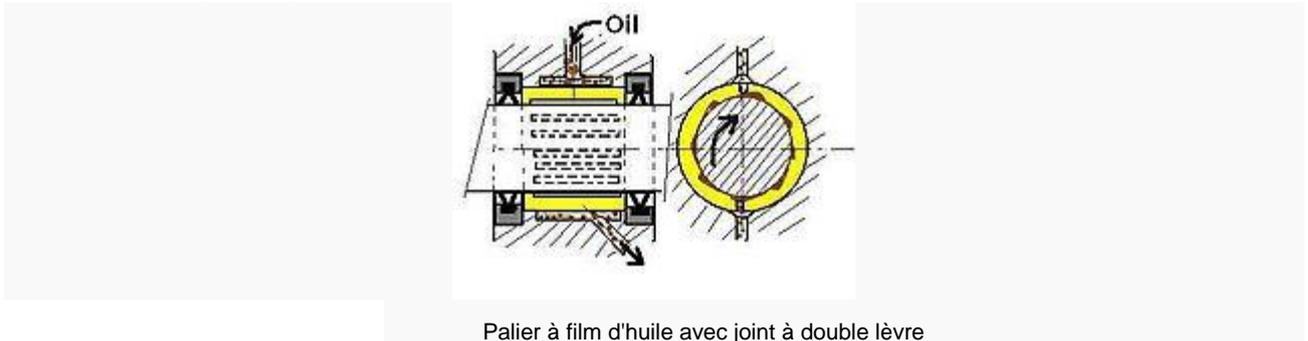
Les coussinets peuvent être d'une seule pièce ou en deux parties pour faciliter le montage. La matière employée est fonction de l'usage et du prix de revient.

Économiques, souvent utilisés, les coussinets sont des bagues cylindriques, de forme tubulaire, avec ou sans collerette, interposés entre un arbre et son logement pour faciliter le mouvement de rotation.

Construits à partir de matériaux présentant de bonnes qualités (bronze, étain, plomb, graphite, Téflon, PTFE, polyamide), ils peuvent, suivant les variantes, être utilisés à sec ou avec lubrification.

Il existe de nombreuses familles aux dimensions normalisées et de nombreux produits dérivés : rondelles, rotules, bandes de frottement, pièces sur mesure.

- *Métallique* : fonte douce (ou fonte grise) ou bronze phosphoreux, pour les faibles charges et vitesse réduite.
- *Métallique antifriction* :
 - bronze ou fonte avec revêtement antifriction ;
 - régule, alliage de plomb, étain et/ou Antimoine, utilisé surtout dans la grande série comme l'automobile (montage bielle-manivelle ou paliers d'arbre à cames), excellent rapport qualité-prix.
- *Matière frittée* , avec des poudres métalliques imprégnées de lubrifiant ou des céramiques. Permet d'obtenir des formes complexes et d'épaisseur réduite.
- *Matière plastique* : elle présente, par rapport au bronze, un faible coefficient de frottement, une meilleure résistance à l'usure, l'absence de grippage et une simplification de la lubrification qui peut même être réalisée avec de l'eau. Ces coussinets ont leur utilisation aussi bien dans les très petites mécaniques que dans les grosses applications telles que les paliers de laminoir ou les paliers d'arbre porte hélice qui travaillent dans l'eau.
- *Bois compressé* : généralement pour des coussinets auto-graissés par injection d'huile dans la matière.
- *Céramique composite* à très forte résistance à l'abrasion.



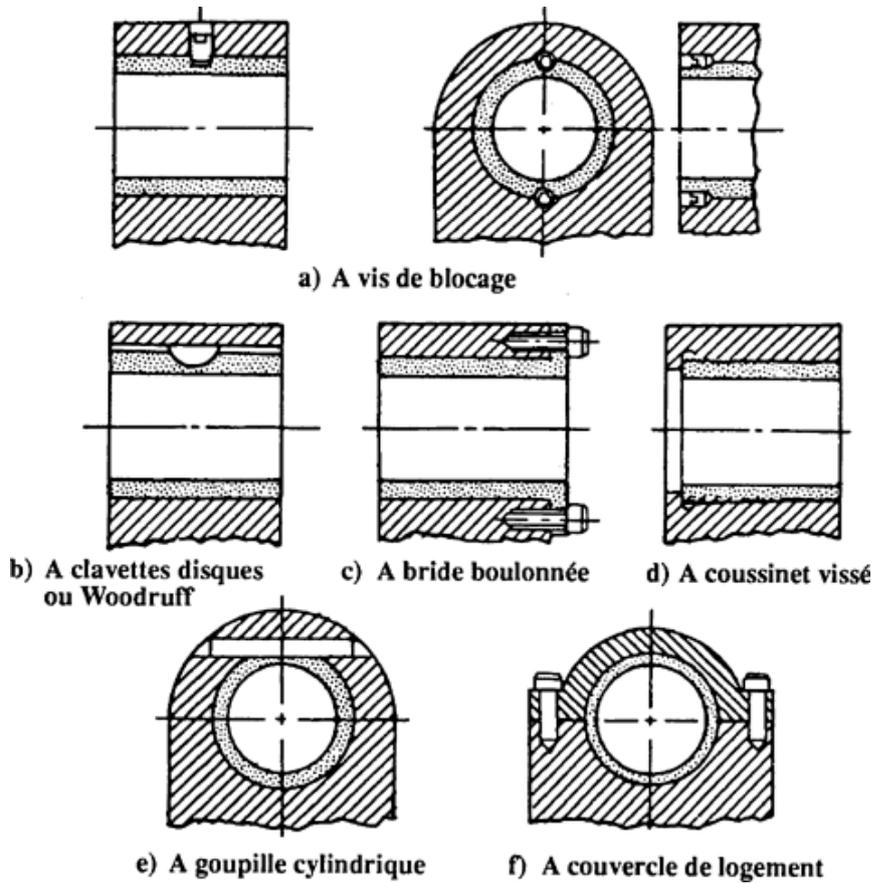
Palier à film d'huile avec joint à double lèvre

- *À film d'huile* : pour les paliers de grands diamètres d'arbre où on veut réduire la température due au frottement, en lubrifiant avec un film d'huile total obtenu par la vitesse de rotation et des coussinets spécifiques (paliers Mitchell). Ils permettent des charges très élevées et une plus grande vitesse de rotation tout en réduisant les pertes d'énergie dues au frottement.
 - Le coussinet est pourvu de petites gorges où la vitesse de rotation vient « coincer » l'huile entre celui-ci et l'arbre, qui est automatiquement centré sur le palier.

Une application bien connue et très répandue est l'utilisation du palier à bain d'huile des turbocompresseurs qui équipent nos véhicules et supportent des vitesses et des températures très élevées. Dans l'aéronautique, ces paliers sont utilisés pour les moteurs qui peuvent avoir plus de 100 paliers de tous types et dont l'énergie totale consommée par frottement est inférieure à 1 % de l'énergie des moteurs.

- *À film d'air* : les coussinets sont pourvus de fines perforations par où l'air envoyé sous pression permet la rotation de l'arbre sur un *coussin d'air*, supprimant le contact direct matière sur matière et donc le frottement, l'usure, l'échauffement et la lubrification.

Modes de fixation des coussinets

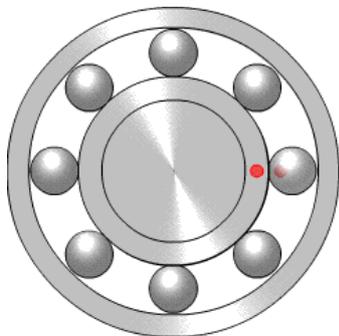


Paliers à roulements

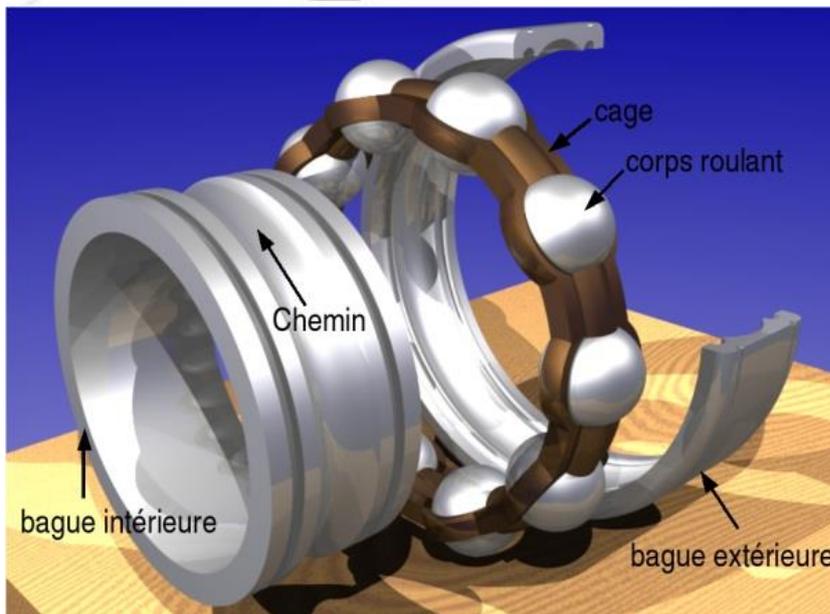
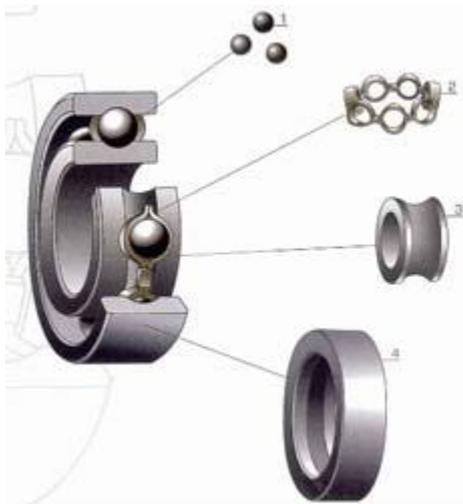
Les paliers sont réalisés en fonction du type de roulement employé : à billes, à rouleaux ou à aiguilles. Le montage des roulements dans les paliers demandait une précision d'alésage qui a fortement été diminuée par l'adoption des colles de scellement (par exemple la Loctite). Cette colle, après positionnement correct de l'arbre, maintient solidement (dans le sens radial) le roulement dans son logement.

Le maintien des roulements dans le sens axial peut être assuré par des collerettes vissées ou des anneaux élastiques. Tous ces montages dépendent de l'utilisation, des efforts et du coût de revient.

Roulement à billes



Un **roulement mécanique** permet le positionnement, la transmission des efforts et la rotation entre deux pièces par le remplacement du glissement en un roulement. Ce composant mécanique optimise le frottement et la précision de la liaison cinématique.



L'exemple connu le plus ancien du principe du roulement, en remplacement du glissement, est certainement celui des constructeurs de pyramides qui ont intercalés des rondins de bois entre les blocs de pierre et le sol pour faciliter leur déplacement.

Plus tard, au 15ème siècle, Léonard de Vinci théorisa la géométrie des roulements. On trouve beaucoup de descriptions détaillées de systèmes de guidages par éléments roulants dans ces écrits. Enfin, la publication des travaux de Heinrich Hertz sur les déformations des corps en contact contribua beaucoup à améliorer les performances des roulements.

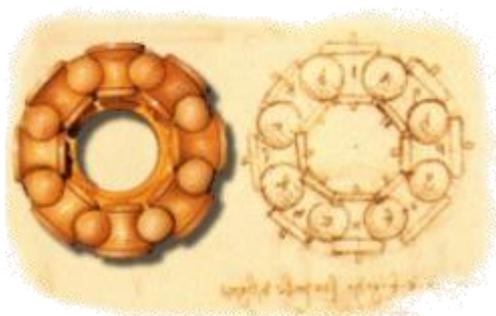


Schéma et réalisation en bois d'un roulement à bille par Léonard de Vinci au 15ième siècle

Un roulement à billes se présente sous la forme de deux bagues coaxiales entre lesquelles sont placées des billes, légèrement lubrifiées, et maintenues espacées par une cage.

Le roulement n'étant par principe pas étanche, il faut veiller à le protéger des poussières et autres corps étrangers qui pourraient s'y loger, accélérant son usure et diminuant son rendement. Les roulements sont néanmoins souvent équipés de flasques permettant d'éviter d'avoir à effectuer l'étanchéité.

La liaison mécanique équivalente entre les deux bagues d'un roulement dépend du type d'éléments roulants et de la disposition des contacts de ces éléments avec les bagues. La liaison locale obtenue entre l'arbre et son logement est de plus tributaire de la manière dont le roulement est fixé à l'arbre et à l'alésage. Il est souvent nécessaire, pour réaliser une liaison pivot d'utiliser deux roulements, une des solutions isostatiques étant l'association d'une liaison rotule et d'une linéaire annulaire.

Par abus de langage on utilise la même désignation, roulement à billes pour nommer toute sorte de roulements. On doit cependant les distinguer par la forme des éléments roulants :

- La bille est le cas le plus connu, mais les rouleaux cylindriques ou coniques sont aussi très employés dans les montages nécessitant une plus grande rigidité.
- Certains roulements à rotule sont munis de rouleaux en forme de barillet.
- Enfin lorsqu'il s'agit de rouleaux cylindriques très longs devant leur diamètre on parle d'aiguilles.

À chaque modèle correspondent des performances particulières et donc un usage spécifique.

Par exemple, les roulements à rouleaux supportent des charges supérieures par rapport aux roulements à billes (de taille équivalente), car le contact des éléments roulants avec les bagues est linéaire. Cependant, ils acceptent des fréquences de rotation moins élevées. Les cages à aiguilles sont moins encombrantes mais exigent une préparation des portées (trempe).

Roulement à billes à contacts droits

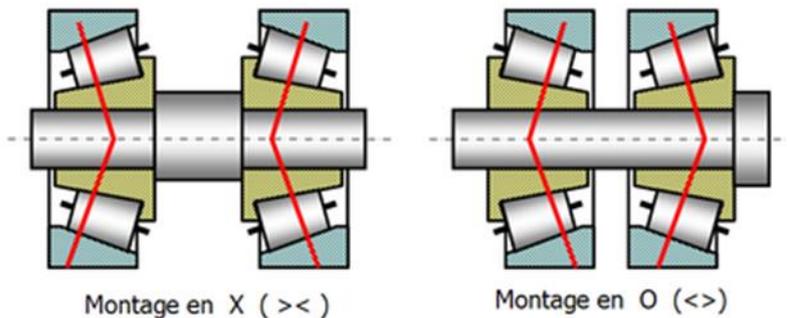
Très économiques, ce sont les plus utilisés en petites et moyennes dimensions. Ils supportent tous les types de charges (modérées à moyennes): axiales, radiales et combinées. Sous charge, ils se comportent comme un roulement à contact oblique dont l'angle d'inclinaison serait variable. Variantes: versions avec rainure et segment d'arrêt, versions étanches d'un ou des deux côtés (étanchéité par flasques en tôle ou par joints élastomères). Les versions étanches des 2 côtés sont graissées à vie.



Roulement à rouleaux coniques

Ils supportent des efforts axiaux et radiaux importants. Du fait de la disposition des contacts de roulement, les bagues peuvent se désolidariser par translation axiale. Ils ne posent donc pas les mêmes problèmes d'assemblage que les roulements à billes.

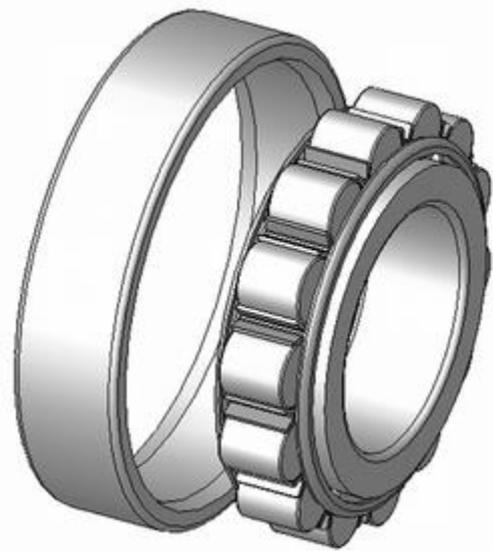
Ils constituent une liaison rotule équivalente (unilatérale) entre les bagues. D'une grande rigidité, ce type de composant est idéal pour les guidages de grande précision devant subir de gros efforts (pivot de roue de véhicules, broches de machines).



Pour le guidage d'un arbre, comme les roulements à billes à contact oblique, ils sont généralement associés par paire en opposition. Suivant la disposition des composants, on obtient un montage dit *en O* ou *en X*:

- si les centres de poussée sont situés à l'extérieur des roulements, les droites d'actions mécaniques des éléments roulants forment un O (<>)
- si les centres de poussée sont situés entre les roulements, ces droites forment un X.

Roulement à rouleaux cylindriques



Ils supportent un léger défaut d'alignement. Il y a deux types de roulements à rouleaux :

- Sur deux rangées de billes type BS : ils supportent des charges radiales élevées.
- Sur deux rangées de rouleaux type SC : ils supportent des charges radiales encore plus élevées.

Roulement rotule à rouleaux



Du fait de la forme et la disposition des rouleaux, ces roulements acceptent un grand déversement relatif des deux bagues (plusieurs degrés). Ils conviennent alors parfaitement pour le guidage d'arbres très longs, pour lesquels il est impossible d'aligner les portées lors de leur réalisation, comme par exemple le guidage d'arbre d'hélice de bateau.

Roulement à aiguilles



Il ressemble au roulement à rouleaux, mais ses éléments roulants ont un diamètre beaucoup plus petit (comparé à leur longueur). Il a donc l'avantage d'être moins encombrant, ce qui est intéressant quand l'espace radial est petit : C'est la solution retenue pour la liaison des croisillons d'un joint de cardan avec les deux moyeux.

Il existe des roulements complets avec les deux bagues mais aussi des modèles ne présentant que la bague extérieure, ou alors seulement la cage tenant les éléments roulants. Dans ce cas, les portées doivent être de dureté suffisante. Le roulement n'est alors pas le seul composant d'usure.

Le type à cage est plus résistant, particulièrement aux hautes vitesses. Il est par exemple utilisé sur les axes de pistons des moteurs à deux temps, dont la faible lubrification ne permet pas l'utilisation de paliers lisses.

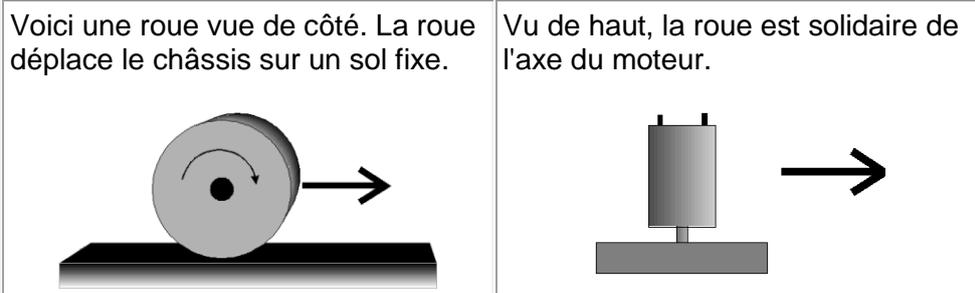
Représentation simplifiée des roulements. Norme AFNOR E04-114.						
Type	ROULEMENTS A BILLES					
	1 rangée	2 rangées	2 rangées à rotule	2 rangées à rotule	1 rangée à contact oblique	2 rangées à contact oblique
Représentation complète						
Représentation simplifiée						
Type	ROULEMENTS A ROULEAUX CYLINDRIQUES				ROULEMENTS A ROULEAUX CONIQUES	ROULEMENTS A ROULEAUX SPHÉRIQUES
	N	NU	NJ	RNU		
Représentation complète						
Représentation simplifiée						
Type	BUTÉES A BILLES		BUTÉES A ROULEAUX SPHÉRIQUES	REPRÉSENTATION SYMBOLIQUE GÉNÉRALE		
	simple effet	double effet	à rotule			
Représentation complète						
Représentation simplifiée						

Deuxième partie : les transformations de mouvements

Les transformations de mouvements qui nous intéressent, sont des systèmes qui utilisent la rotation d'un moteur (l'axe du moteur tourne) pour réaliser un mouvement de translation (de gauche à droite, de haut en bas ou d'avant en arrière).

La roue

Le système le plus connu est la roue. Si on fixe une roue sur l'axe du moteur, la roue tourne et fait avancer ou reculer un chariot. Le moteur doit être solidaire du châssis du véhicule.



Ce système est utilisé dans les véhicules comme les voitures et les trains. Les roues tournent et font avancer le véhicule sur la route. Il peut aussi être utilisé pour déplacer linéairement sur une courte distance un chariot mobile sur un équipement de production éventuellement avec un rail guide.



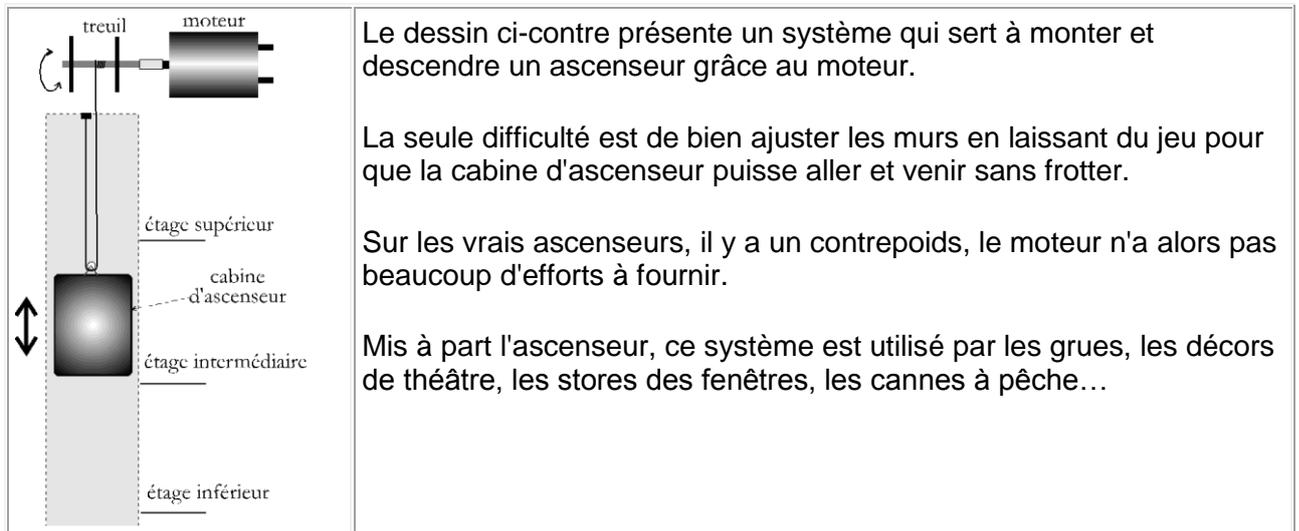
Chariot mobile d'accrochage guidé par rail suspendu



Chariot cavalier pour container

Le treuil

Le système du treuil, aussi appelé système de la bobine est le plus facile à réaliser. Il s'agit de se servir d'un moteur pour enrouler et dérouler un fil sur une bobine. Au bout du fil, on attache n'importe quel objet. Cet objet sera alors tiré ou relâché par le mouvement du moteur.



Treuil électrique

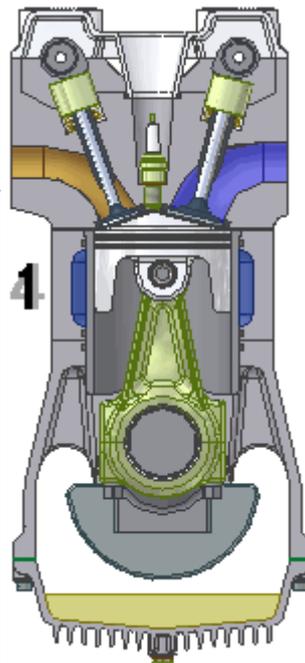
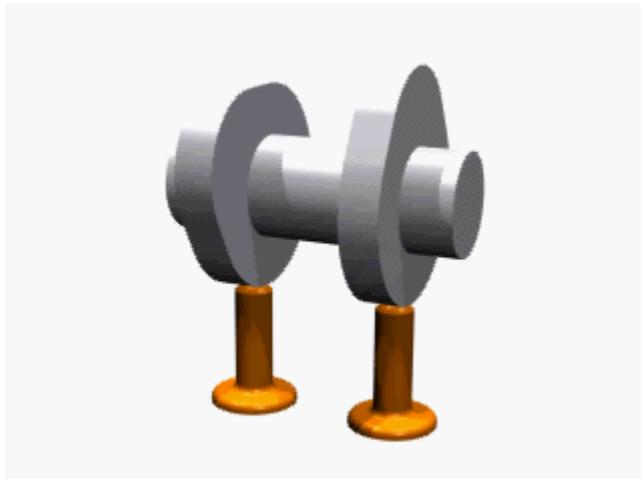
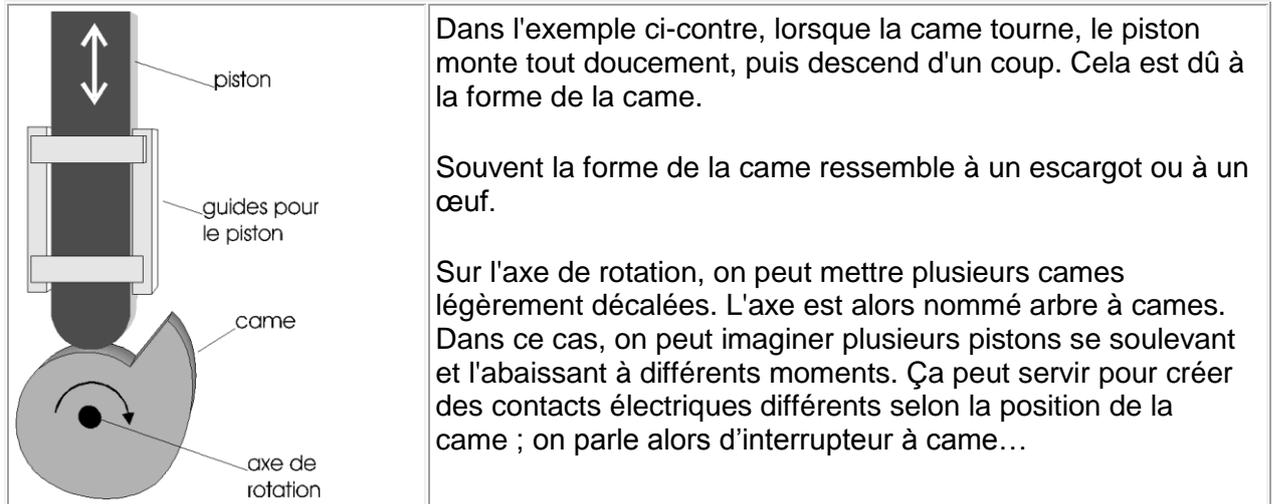


Treuil manuel

La came

La came permet de réaliser des mouvements de va-et-vient intermittents.

Ce système est utilisé dans les moteurs de voitures pour ouvrir et fermer des clapets (soupapes) pour amener l'air et l'essence et aussi pour dégager les gaz d'échappement après explosion.



Cames pour l'actionnement des soupapes de moteur thermique

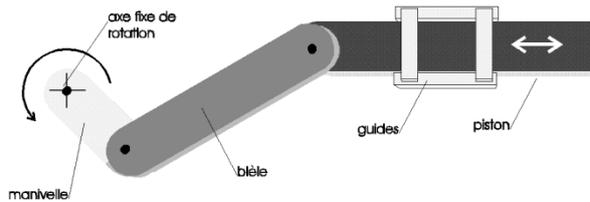


Arbre à came

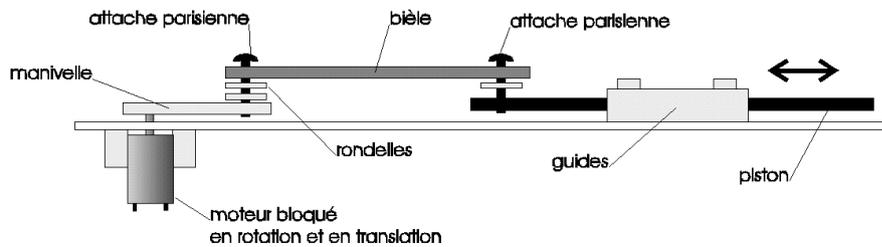
La bielle-manivelle

Qui a vu un jour un Western a vu une bielle-manivelle. C'est le système qui permet de faire tourner les roues d'un train à vapeur à partir d'un piston (c'est exactement l'inverse de ce que nous cherchons à faire). Le principe est de faire tourner une manivelle qui est reliée à un piston par une pièce intermédiaire appelée bielle. Le piston va et vient de manière rectiligne (régulière et droite).

Voici le dessin du système vu de haut.



Et voici le même système vu de dessous.



Les guides sont là pour empêcher le piston de faire un autre mouvement que celui de droite à gauche.

Il y a deux difficultés dans la réalisation de ce montage.

La première consiste à bien choisir la taille de chaque pièce ; manivelle, bielle, piston et guides. Un indice, la bielle doit être plus grande que deux fois la longueur de la manivelle.

La seconde difficulté est de réaliser des axes qui permettent de bien faire tourner les pièces. Des attaches parisiennes avec quelques rondelles métalliques fixées dans des trous assez larges devraient satisfaire.

On voit souvent la manivelle remplacée par un disque. C'est alors plus facile à ajuster.

On peut bien entendu tourner le système pour que le piston fasse un mouvement de haut en bas.

Ce système est utilisé dans toutes sortes de moteurs.

La roue dentée

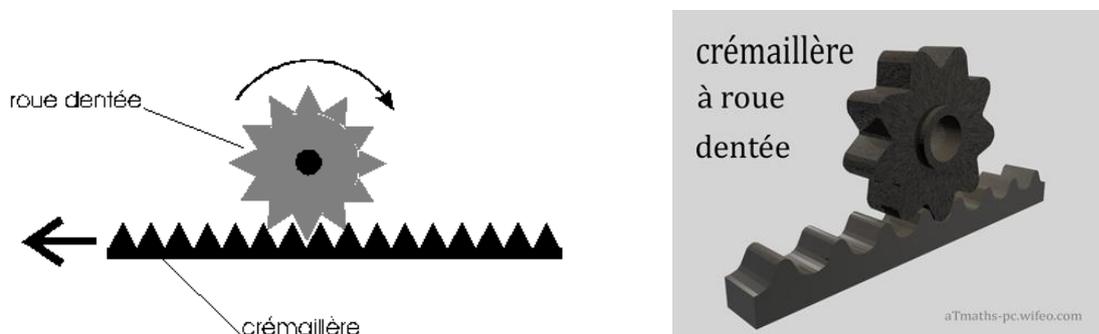
Un dérivé de la roue est la roue dentée (pignon) et la crémaillère.

C'est aussi une roue, mais pour être sûr qu'elle accroche bien à la surface, elle dispose de petites dents qui épousent les creux présent sur la surface (crémaillère). Le moteur fait tourner la roue dentée.

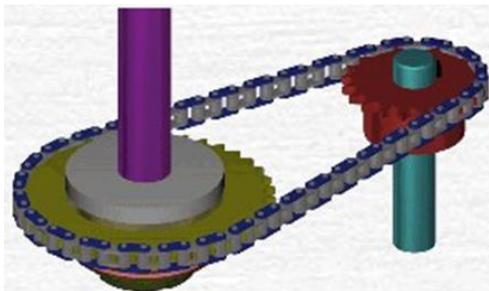
Lorsque la roue dentée tourne, il y a deux possibilités :

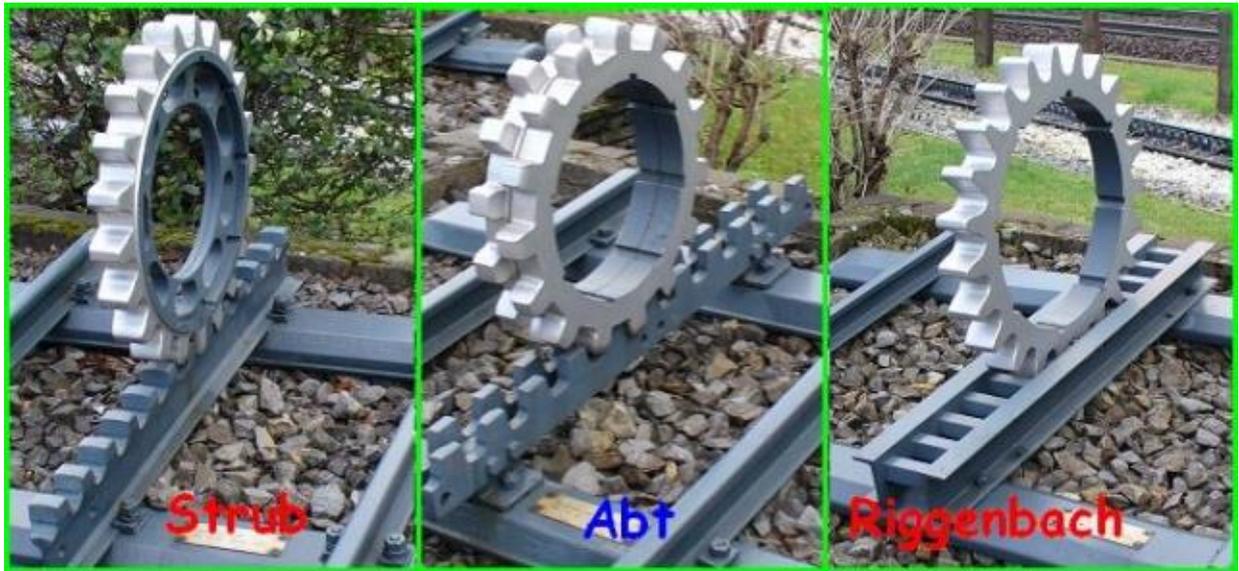
- si la surface est fixe, la roue dentée se déplace,
- si la roue est fixe, la surface se déplace.

Le système de la roue dentée et crémaillère ci-dessous illustre le cas de la crémaillère qui bouge.



On peut bien entendu renverser le système pour faire monter et descendre un objet. Ce système est utilisé par les trains de montagne, lorsque les pentes sont très fortes. Lorsque les crémaillères sont souples, il s'agit de courroies crantées et lorsqu'elles sont composées de maillons, de chaînes. On peut en voir sur les bulldozers et les chasse-neige.

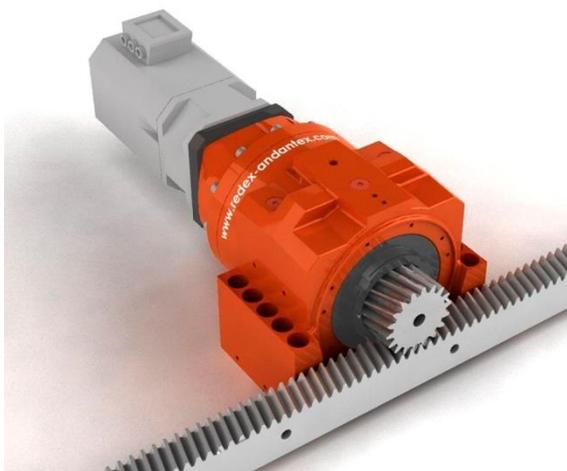




Différents modèles de crémaillères utilisées dans les chemins de fer Suisses



Crémaillère du train de la Furka (Suisse)



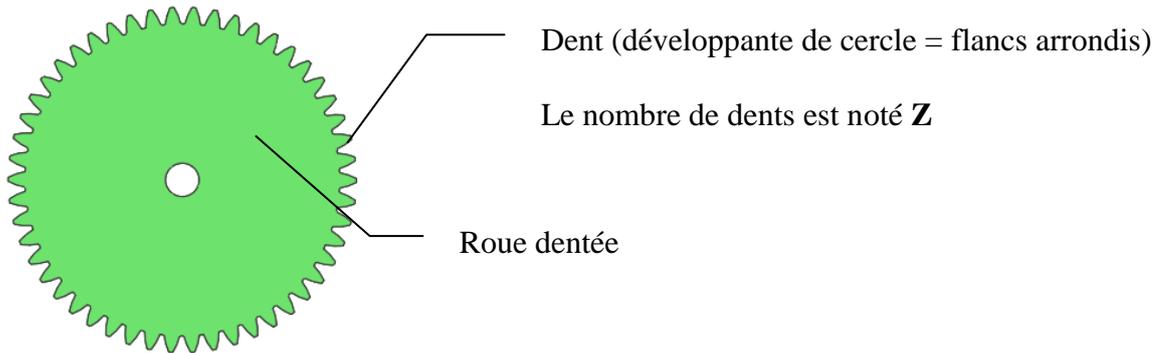
Entraînement motorisé pignon-crémaillère



Chariot mobile motorisé entraîné par une crémaillère

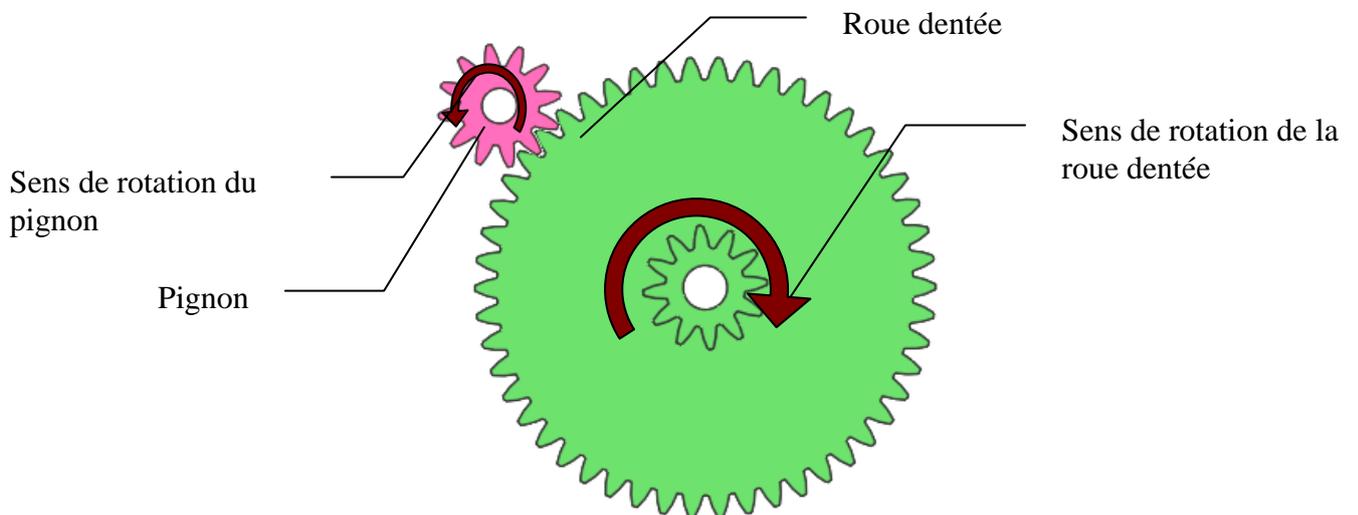
Les engrenages

Vocabulaire associé à une roue dentée (ou pignon) :



Vocabulaire associé à un engrenage :

- Un engrenage est constitué d'un pignon et d'une roue dentée.



- Le pignon tourne plus vite que la roue dentée. On dit que la vitesse de rotation du pignon est plus grande que la vitesse de rotation de la roue dentée.
- Le rapport de réduction d'un engrenage est la division de la vitesse de rotation de la roue dentée par le pignon.

$$r = \omega_{\text{roue dentée}} / \omega_{\text{pignon}}$$

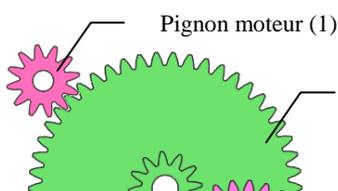
- Le rapport de réduction r est égal au rapport inverse du nombre de dents.

$$r = \omega_{\text{roue dentée}} / \omega_{\text{pignon}} = Z_{\text{pignon}} / Z_{\text{roue dentée}}$$

- Ce rapport est sans unité.

Application au calcul du rapport de réduction d'un réducteur :

Rappel : Réducteur est un système mécanique qui permet de réduire la vitesse de rotation.



Vitesse de rotation du pignon moteur :

- Il y a 2 engrenages, donc 2 rapports de réduction :

$$\begin{array}{ll} r_1 = \omega_2/\omega_1 = Z_1/Z_2 & r_1 = 12/40 \\ r_2 = \omega_3/\omega_2 = Z_2/Z_3 & r_2 = 17/30 \end{array}$$

- Le rapport de réduction du réducteur :

$$\begin{array}{l} r = \omega_3/\omega_1 = \omega_3/\omega_2 \times \omega_2/\omega_1 = r_2 \times r_1 \\ r = (17/30) \times (12/40) = 0.17 \end{array}$$

- La vitesse de rotation de (3) si le moteur tourne à 1500tr/min est:

$$\omega_3 = r \times \omega_1 = 0.17 \times 1500 = 255 \text{ tr/min}$$

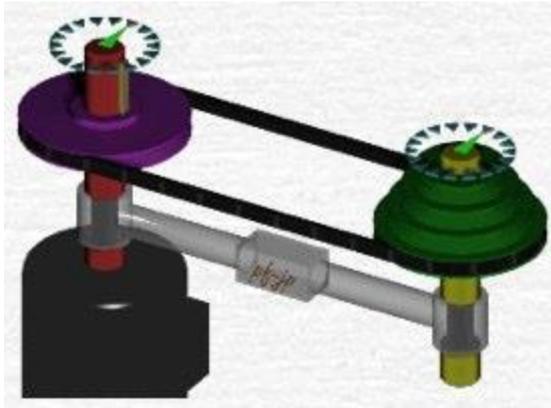
- La vitesse de rotation de (3) doit être plus petite que celle de (1). C'est bien le rôle du réducteur de vitesse.

Voir <http://talbi.voila.net/M313.htm>

Transmission par courroie ou par friction directe

- Deux roues de diamètres différents
- Conservation du mouvement de rotation
- Conservation du sens de rotation
- Vitesse de rotation de la petite roue supérieure à celle de la grande

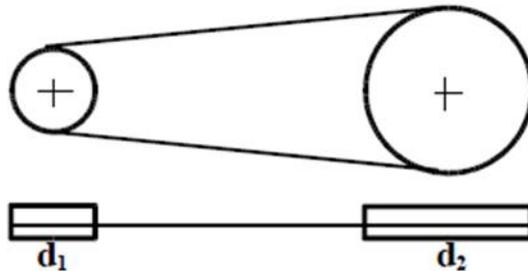
Ex : entraînement du tambour d'un lave-linge, ventilateur d'une voiture
(nombre de tours proportionnel au diamètre)



1) Représentation.

(consultez votre livre).

2) Schématisation.



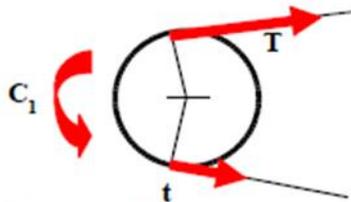
3) Rapport de transmission.

$$. r = N_2/N_1 = d_1/d_2 .$$

4) Avantages et inconvénients.

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> - souplesse de la transmission (élasticité de la courroie) - possibilité de faire varier l'entraxe - pas de lubrification - coût d'achat et d'installation réduit - silencieux 	<ul style="list-style-type: none"> - rapport de transmission irrégulier (si glissement de la courroie et de la poulie) - nécessité d'un tendeur de courroie (même dispositif que pour les chaînes)

5) tensions dans les brins de la courroie.



T : tension dans le brin tendu
t : tension dans le brin mou
C₁ : couple moteur
R₁ : rayon de la poulie motrice

Théorème du moment résultant en projection sur l'axe z : $C_1 + t \cdot R_1 - T \cdot R_1 = 0$
 d'où : $. T - t = C_1/R_1 .$

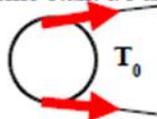
à la limite du glissement, on a : $. T = t \cdot e^{f\alpha} .$ pour une courroie plate.

on a : $. T = t \cdot e^{3f\alpha} .$ pour une courroie trapézoïdale.

Avec : **f** : coefficient de frottement entre la courroie et la poulie.

α : angle d'enroulement en radians.

Pour éviter le glissement, il est nécessaire de prévoir une tension de pose **T₀** au montage (le système étant à l'arrêt).



avec : $. T_0 = \frac{1}{2} (T + t) .$

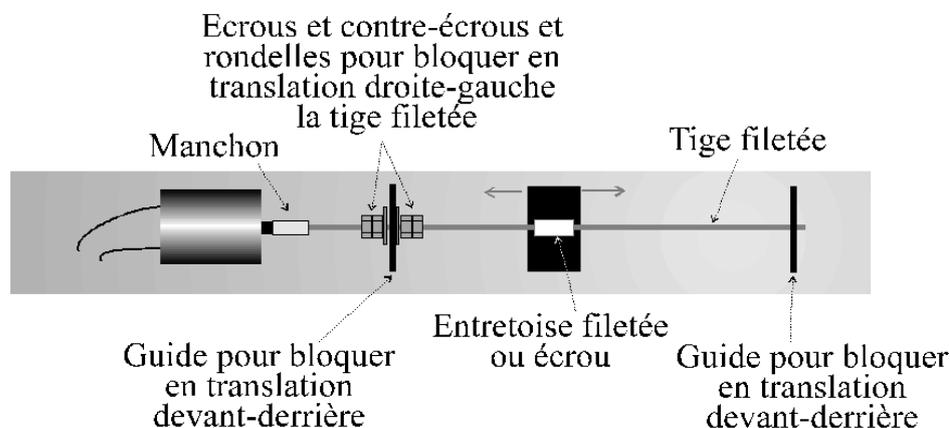
La vis sans fin

La vis sans fin n'est pas facile à comprendre au début. Le système est également difficile à mettre au point. On a du mal à savoir ce qui doit pouvoir bouger et ce qui doit rester fixe.

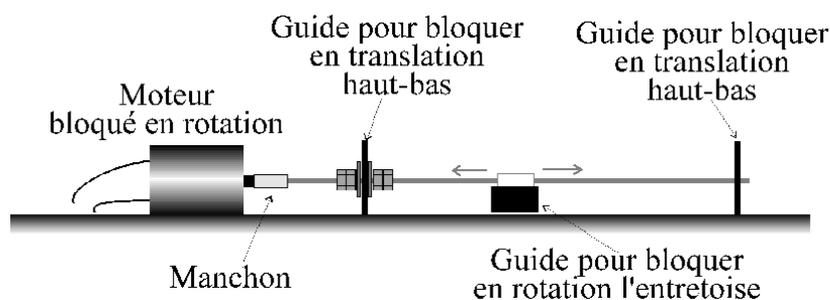
Le principe est le suivant : lorsqu'on prend un tournevis pour visser une vis, la vis s'enfonce dans la planche. On peut dire qu'elle avance. Si maintenant, la planche peut se déplacer et si le tournevis est fixe, si je tourne la vis, c'est la planche qui va se déplacer en se rapprochant.

Les deux dessins suivants montrent comment réaliser un système de vis sans fin avec une tige filetée et une entretoise filetée (ou tout simplement un écrou). Il faut bien penser aux guides et aux écrous contre-écrous qui tiennent le montage.

Système vu de haut.



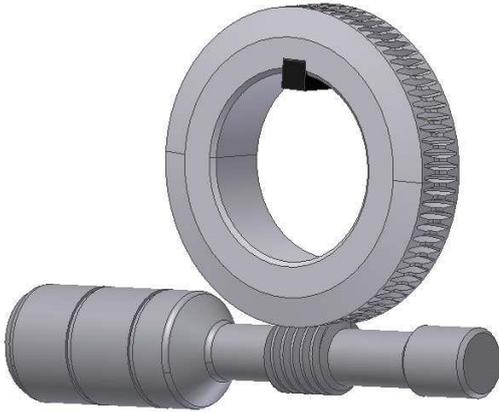
systeme vu de côté.



Ce système est utilisé pour ouvrir et fermer les portes d'ascenseur, lever et baisser les bennes des camions, pour régler la hauteur des phares des voitures...

Représentation et schématisation.

Représentation d'une roue et vis sans fin:



Rapport de transmission d'une roue et vis sans fin.

$$r = \frac{N_{\text{roue}}}{N_{\text{vis sans fin}}} = \frac{\text{nombre de filets de la vis sans fin}}{\text{nombre de dents de la roue}}$$

Réversibilité – irréversibilité et rendement.

Un système composé de deux éléments est dit réversible lorsque les deux éléments peuvent être moteurs ou récepteurs alternativement. Si l'un des deux éléments ne peut pas entraîner l'autre, on dit que le système est irréversible.

Pour un système roue et vis sans fin, la réversibilité ou l'irréversibilité dépendent :

- de l'angle d'hélice de la roue : β_{roue} (angle des dents de la roue)
- de l'angle de frottement : φ (qui est fonction de la nature des matériaux utilisés)
- du mode d'utilisation : réducteur ou multiplicateur de vitesse

VIS	ROUE	Irréversible si
Motrice	Réceptrice	JAMAIS
Réceptrice	Motrice	$\beta_{\text{roue}} < \varphi$

rendement
$\eta = \frac{\tan \beta_{\text{roue}}}{\tan (\beta + \varphi)}$
$\eta = \frac{\tan (\beta_{\text{roue}} - \varphi)}{\tan \beta}$

Le rendement est souvent compris entre 0,35 et 0,65.

Bibliographie

Webographie

Questions globales d'examen pour la partie électricité

- 1) Expliquer les notions de
 - a. tension alternative,
 - b. valeur efficace, crête à crête, moyenne,
 - c. facteur de puissance,
 - d. puissance active, réactive et apparente
 - e. rapports entre ces puissances
- 2) Comparer les trois types de dipôles de base par rapport à la relation courant/tension/puissance :
 - a. résistance,
 - b. Inductance,
 - c. Condensateur
- 3) Expliquer le fonctionnement complet du transformateur monophasé et les bases du transformateur triphasé
 - a. Principe du transformateur
 - b. Constitution
 - c. Utilisations
 - d. Pertes et rendement
 - e. Notions de transformateurs triphasés
- 4) Expliquer la notion de courant triphasé et de couplage étoile/triangle avec application au moteur asynchrone
 - a. Raccordement étoile (tensions et courants)
 - b. Raccordement triangle (tensions et courants)
 - c. Démarrage étoile-triangle : utilité
- 5) Expliquer la constitution et le fonctionnement du moteur asynchrone
 - a. Constitution : rotor stator
 - b. Principe de fonctionnement champ tournant
 - c. Notion de glissement vitesse de synchronisme
 - d. Courbes caractéristiques
- 6) Expliquer la constitution et le fonctionnement du moteur à courant continu
 - a. constitution : rotor stator bagues balais
 - b. Principe de fonctionnement
 - c. Modes d'excitation
 - d. Courbes caractéristiques

Questions globales d'examen pour la partie mécanique

- 1) Décrivez le système boulon-vis-ecrou
- 2) Décrivez l'utilité et les types de Clavettes
- 3) Décrivez les différents types de paliers et leurs applications
- 4) Décrivez les roulements à billes et leurs différentes variantes
- 5) Décrivez l'utilisation des cames avec un exemple pour les soupapes automobile
- 6) Décrivez la notion d'engrenage, de crémaillère, de chaîne et de courroie

Notes :

- **L'examen est un examen oral**
- **Les 2 questions sont tirées au sort parmi les 2x6 questions définies dans le cours (électricité appliquée + mécanique appliquée, une question de chaque partie)**
- **La préparation de la question se fera obligatoirement par écrit et les feuilles de préparation signées seront récupérées par le professeur à la fin de l'examen**
- **Chaque question sera accompagnée d'un ou de plusieurs exercices proposés par le professeur du type de ceux faits au cours en lien direct ou non avec la question tirée.**

Planning du cours :

Cours 1 :

1. tension alternative sinusoïdale,
2. valeur efficace, crête à crête, moyenne,
3. facteur de puissance,
4. types de dipôles de base par rapport à la relation courant/tension/puissance :
 1. résistance,
 2. Inductance,
 3. Condensateur

Cours 2 :

1. Puissance active, réactive et apparente
2. Rapports entre ces puissances
3. Exercices sur les puissances

Cours 3 :

1. Principe du transformateur
2. Constitution
3. Utilisations
4. Pertes et rendement

Cours 4 :

1. notion de courant triphasé et de couplage étoile/triangle avec application au moteur asynchrone
2. Raccordement étoile (tensions et courants)
3. Raccordement triangle (tensions et courants)
4. Notions de transformateurs triphasés
- 5.

Cours 5 :

1. constitution et le fonctionnement du moteur asynchrone
2. Constitution : rotor stator
3. Principe de fonctionnement champ tournant
4. Notion de glissement vitesse de synchronisme
5. Courbes caractéristiques

Cours 6 :

1. Démarrage étoile-triangle : utilité
2. Démarrage étoile-triangle des moteurs asynchrones
3. Autres types de démarrages
4. Variateurs de vitesse

Cours 7 :

1. constitution et fonctionnement du moteur à courant continu
2. constitution : rotor stator bagues balais
3. Principe de fonctionnement
4. Modes d'excitation
5. Courbes caractéristiques

Partie mécanique

Cours 8 :

1. Assemblages
2. Ecrous et boulons
3. filetages

Cours 9 :

1. Clavettes
2. Paliers
3. Roulements à billes

Cours 10 :

1. Transformation des mouvements
2. Roue
3. Treuil
4. Came
5. Bielle-manivelle

Cours 11 :

1. Roue dentée
2. Engrenages

Cours 12 :

1. Transmission par courroies
2. Vis sans fin

(Cours 13)