

Physique Appliquée

Ce document présente très rapidement les notions de base et les phénomènes électromagnétiques présents dans les machines électriques.

En complément il y a des liens - malheureusement, il y a beaucoup plus de ressources en anglais qu'en français ...

NOTIONS DE MAGNÉTISME

1 - Les phénomènes magnétiques.....	2
1.1 - Induction et flux magnétiques.....	2
1.2 - La création de champ magnétique.....	2
1.2.1 - Les aimants permanents.....	2
1.2.2 - Les électroaimants. - excitation et perméabilité magnétique.....	3
1.3 - Matériaux ferromagnétiques.....	4
1.4 - Courbe d'aimantation - hystérésis.....	4
1.5 - Inductance d'une bobine.....	6
1.6 - Courant, flux et inductance magnétisants.....	7
1.7 - Fonctionnement à flux forcé.....	7
2 - Les phénomènes électromagnétiques.....	8
2.1 - La création d'une force mécanique.....	8
2.2 - Le couple électromagnétique d'une machine électrique.....	8
2.3 - La création d'une tension électrique - le phénomène d'induction.....	9
2.4 - Relation entre flux et tension sinusoïdaux.....	10
2.5 - Caractéristique à vide d'une machine.....	11
2.6 - Le courant (induit) dans une génératrice.....	12
2.7 - Courants de Foucault.....	12
2.8 - Les pertes Fer.....	13
Les pertes par hystérésis.....	13
Les pertes par courants de Foucault.....	13
2.9 - Modélisation des pertes fer.....	14
2.10 - La création d'un champ magnétique tournant.....	15
ce qu'il faut savoir sur les champs tournants.....	15



1 - LES PHÉNOMÈNES MAGNÉTIQUES.

1.1 - INDUCTION ET FLUX MAGNÉTIQUES.

Magnetic induction

L'intensité du champ magnétique B (« induction magnétique ») se mesure en Tesla (T).

L'intensité du champ magnétique terrestre est d'environ $50\mu\text{T}$.

Dans les machines, on arrive à créer des champs de 1 à 2T maximum.

Magnetic flux

Lorsqu'on s'intéresse aux effets d'un champ magnétique sur un objet, on utilise la notion de flux magnétique Φ à travers une section droite S : $\Phi = B \times S$.

Le flux Φ se mesure en Wéber (Wb) : $1\text{Wb} = 1\text{T} \times 1\text{m}^2$.

L'induction est la densité de flux (flux par m^2).

Pour augmenter l'effet du champ magnétique dans une machine, comme l'intensité du champ magnétique est limitée, on augmente la surface traversée par ce champ (donc la section de la machine) afin d'augmenter le flux.

1.2 - LA CRÉATION DE CHAMP MAGNÉTIQUE.

Les champs magnétiques sont créés soit par des aimants permanents soit par des électroaimants.

1.2.1 - LES AIMANTS PERMANENTS.

Permanent magnet

Les aimants permanents sont constitués d'alliages contenant du fer (Fe), du nickel (Ni) et/ou du cobalt (Co).

On trouve des aimants en ferrite, en AlNiCo ou en Terres rares.

On classe les aimants permanents en fonction de l'intensité du champ magnétique qu'ils créent (champ rémanent B_r), de leur capacité à se démagnétiser (excitation coercitive H_c) et de leur température de Curie.

Si on dépasse cette température, l'aimant perd son aimantation.

[Vidéo : spectre magnétique d'un aimant permanent](#)

[Vidéo : fabrication d'un aimant permanent](#)

[vidéo : effet de la température sur un aimant](#)



1.2.2 – LES ÉLECTROAIMANTS. – EXCITATION ET PERMÉABILITÉ MAGNÉTIQUE.

C'est le courant électrique qui crée le champ magnétique d'un électroaimant.

La relation entre le champ magnétique et le courant est établie à partir du « théorème d'Ampère ».

L'intensité du champ magnétique dépend d'une part du circuit électrique (la bobine) et d'autre part du milieu dans lequel on le crée (le noyau de la bobine).

La contribution de la « bobine » est appelée « l'excitation magnétique » H en Ampère.tour/mètre ou A/m .

La contribution du « noyau » est appelé « la perméabilité magnétique » μ - sans unité.

On a la relation $B = \mu H$.

Pour une seule bobine, $H = N I / L$: l'excitation dépend de l'intensité du courant électrique (I), mais aussi du nombre de tours de fils (N) et de la longueur de la bobine (L).

Pour créer un champ de 1T dans de l'air, il faut une excitation de $8 \cdot 10^5$ Ampère tour/mètre.

Le champ magnétique créé dans une bobine à noyau de fer est jusqu'à 10000 fois plus fort que le champ créé dans la même bobine à noyau d'air car $\mu_{fer} = 10^4 \times \mu_{air}$.

Pour augmenter le champ magnétique créé par une bobine, il faut :

- augmenter la perméabilité : utiliser un noyau de fer,
- augmenter l'excitation :
 - augmenter l'intensité du courant (ce qui nécessite d'augmenter la section des conducteurs)
 - ou multiplier le nombre de tours de fil.

1.3 - MATÉRIAUX FERROMAGNÉTIQUES

Les matériaux ferromagnétiques (à base de fer) ont la propriété de canaliser les lignes de champ magnétique, c'est pourquoi le champ magnétique à l'intérieur du matériau ferromagnétique est plus élevé qu'à l'extérieur du matériau.

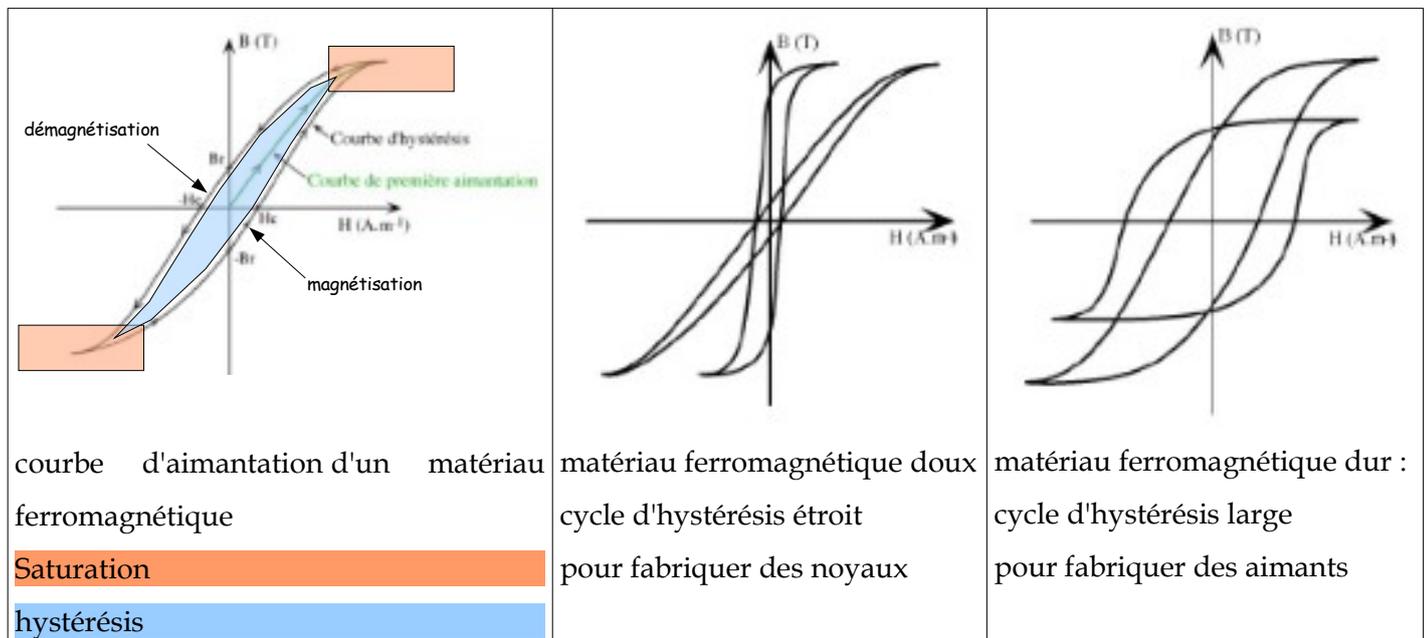
Mais les matériaux ferromagnétiques ont 2 problèmes :

- il y a une saturation du champ magnétique : il est très difficile d'obtenir des champs magnétiques supérieurs à 1,5T.
- il y a une « hystérésis » (effet mémoire) : la valeur du champ magnétique dépend de l'excitation appliquée et du champ magnétique avant l'excitation.

Le champ magnétique dans un matériau ferromagnétique et l'excitation ne sont pas vraiment proportionnels (la perméabilité n'est pas constante), les matériaux ferromagnétiques sont donc caractérisés par leur courbe d'aimantation.

1.4 - COURBE D'AIMANTATION - HYSTÉRÉSIS.

La courbe d'aimantation d'un « circuit magnétique » donne les variations de B ou Φ en fonction de H (excitation) ou I_E (courant d'excitation).





La courbe d'aimantation est découpée en 3 zones :

zone 1 - linéaire : pour les faibles valeurs de B, B et H sont proportionnels - μ est constant ;

zone 2 - coude de saturation : c'est la zone où le champ magnétique est le plus fort avec une excitation encore « raisonnable » - c'est la zone de fonctionnement des machines ;

zone 3 - saturation : pour augmenter légèrement le champ magnétique, il faut augmenter très fortement l'excitation.

La courbe d'aimantation permet de distinguer les matériaux doux et durs.

Dans la zone linéaire, on peut déterminer la valeur de la perméabilité μ qui est le coefficient directeur de la portion de droite B(H).

On peut lire la valeur du champ rémanent B_r (celui qui reste lorsqu'il n'y a plus d'excitation) et l'excitation coercitive H_c (celle qui permet d'annuler le champ magnétique).

Chercher à saturer un matériau ferromagnétique, donc dépasser le courant d'excitation ou la tension d'excitation nominaux, peut être destructeur pour les bobinages à cause des pertes Fer engendrées...

[Vidéo : Courbe d'aimantation, définitions](#)

[Vidéo : relevés de la courbe d'aimantation de différents noyaux](#)

[Video : démagnétiser une pièce en fer](#)



1.5 - INDUCTANCE D'UNE BOBINE.

Une bobine est constituée de N spires.

L'inductance L (en Henry) d'une bobine est le rapport entre le flux magnétique qui traverse cette bobine et le courant qui parcourt la bobine et qui est responsable de ce flux magnétique.

$$L_{bobine} = \{ \text{Flux créée par } I_{bobine} \} / I_{bobine} .$$

$$L_{bobine} = \mu N^2 \frac{S}{L}$$

L'inductance d'une bobine dépend donc de la constitution de son noyau (μ), de sa section S et de sa longueur L, mais aussi du nombre de tours de fils N.

On peut donc fabriquer une inductance ajustée à la demande, en jouant sur la valeur de N - elle sera caractérisée par le courant efficace nominal qui peut traverser les spires.

[Vidéo : fabrication d'une bobine](#)

1.6 - COURANT, FLUX ET INDUCTANCE MAGNÉTISANTS.

Dans un transformateur ou une machine asynchrone, le courant nécessaire pour créer le flux dans la machine est appelé « courant magnétisant ».

Le flux dans la machine est appelé le « flux magnétisant ».

« L'inductance magnétisante » est le rapport entre le flux magnétisant et le courant magnétisant.

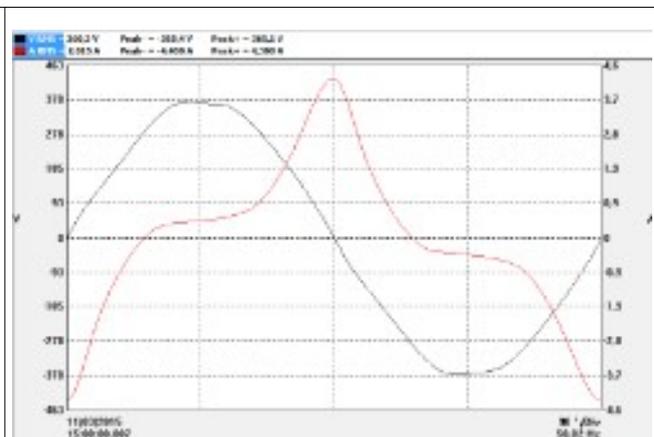
Le courant magnétisant est le courant appelé par ces machines lorsqu'elles fonctionnent à vide.

1.7 - FONCTIONNEMENT À FLUX FORCÉ.

On dit qu'un transformateur ou une machine asynchrone fonctionne à « flux forcé » lorsqu'on constate que leur courant magnétisant n'est pas sinusoïdal, alors que la tension d'alimentation est sinusoïdale.



courbe 1: Transformateur non saturé - courant magnétisant "aplatit" / tension



courbe 2: Transformateur saturé - "pointe" sur le courant magnétisant

Une machine qui fonctionne à flux forcé a un flux sinusoïdal, donc ayant la même forme que la tension mais, à cause de la courbe d'aimantation, le courant magnétisant est déformé (harmoniques de type « charge magnétique », rang 3 et 5 principalement, $TDH_i < 20\%$).

[vidéo : chronogrammes et courbe d'aimantation](#)



2 - LES PHÉNOMÈNES ÉLECTROMAGNÉTIQUES.

Dès qu'un circuit est placé dans un flux magnétique variable, il y a phénomènes « d'induction électromagnétique » et « d'auto-induction ».

2.1 - LA CRÉATION D'UNE FORCE MÉCANIQUE.

C'est ce phénomène qui explique le fonctionnement en moteur d'une machine.

La force élémentaire magnétique est la force de Laplace :

un conducteur électrique (l'induit) de longueur l , parcouru par un courant d'intensité I et placé dans un champ magnétique (inducteur) d'intensité B_{Exc} subit une force d'intensité F :

$$\vec{F} = I \vec{l} \wedge \vec{B}_{Exc} \quad \text{« } \wedge \text{ » est le produit vectoriel.}$$

Cette force s'applique au milieu du conducteur.

Cette force est nulle si le conducteur induit est dans la même direction que le champ inducteur.

La force est perpendiculaire à la fois au conducteur induit et au champ inducteur.

[Vidéo : rail de Laplace](#)

[Vidéo : explications rail de Laplace](#)

2.2 - LE COUPLE ÉLECTROMAGNÉTIQUE D'UNE MACHINE ÉLECTRIQUE.

Au niveau d'une machine électrique, en prenant en compte toutes les forces élémentaires de Laplace, cela revient à créer un couple électromagnétique (noté C_{EM}) moyen $\vec{C}_{EM} = k \vec{B}_I \wedge \vec{B}_{Exc}$.

B_{Exc} est le champ inducteur.

B_I est le champ magnétique créé par le courant d'induit I .

Pour que ce couple EM moyen ne soit pas nul, il faut que les champs B_{Exc} et B_I ne soient pas alignés.

Si les champs sont perpendiculaires, le couple sera maximal.

Si les champs sont tournants, pour qu'il y ait un couple non nul, ils devront tourner à la même vitesse appelée « vitesse de synchronisme ».



2.3 - LA CRÉATION D'UNE TENSION ÉLECTRIQUE – LE PHÉNOMÈNE D'INDUCTION.

Magnetic
induction

Un conducteur de section S soumis à une variation de flux inducteur $\Phi_{Exc} = B_{Exc} \times S$ voit apparaître à ses bornes une force électromotrice e :

$$e = - \frac{d \Phi_{Exc}}{dt} \quad (\text{loi de Lenz Faraday})$$

EMF
Electro
Magnetic
force

c'est parce que cette tension apparaît à cause de la variation de flux qu'on l'appelle « fem » « induite ».

vidéo : apparition d'une tension induite aux bornes d'une bobine

La tension induite est proportionnelle aux variations du flux inducteur. Pour créer de façon simple la variation de flux inducteur à travers l'induit on peut :

- soit faire tourner l'induit par rapport à l'inducteur (Gcc),
- soit faire tourner l'inducteur par rapport à l'induit (GS),
- soit alimenter l'inducteur par un courant variable (MAS, transformateur).

Vidéo : paramètre permettant d'augmenter la fem induite.

Attention : ils confondent fem induite et courant induit

Quelle que soit la manière de créer le flux magnétique, à cause de la rotation, la fem induite dans une bobine ne peut être qu'alternative.

... Il a donc fallu être très ingénieux pour réussir à fabriquer une génératrice à courant continu.



2.4 - RELATION ENTRE FLUX ET TENSION SINUSOÏDAUX.

Dans toutes les machines (même la Mcc) on cherche à avoir dans 1 spire de l'induit un flux, donc une tension, de forme sinusoïdale de pulsation ω (SUPER - on va pouvoir utiliser les nombres complexes).

La pulsation (ou la fréquence) est liée à la vitesse de rotation (voir §2.10).

La loi de Lenz, écrite avec les nombres complexes devient $\underline{E} = -j \omega \underline{\Phi}_{Exc}$.

Cette relation montre que :

- $E = K_1 \times \omega$ à excitation constante (c-a-d flux constant) la fem est proportionnelle à la vitesse de rotation ou à la fréquence d'alimentation,
- $E = K_2 \Phi_{Exc}$ à vitesse et fréquence constante ($\omega = cte$) la fem est proportionnelle au flux,
- $E/\omega = \Phi_{Exc} = K_3$ lorsqu'une machine est alimenté à U sur f constant (en fait $E/\omega = cte$) son flux magnétique reste constant.

2.5 - CARACTÉRISTIQUE À VIDE D'UNE MACHINE.

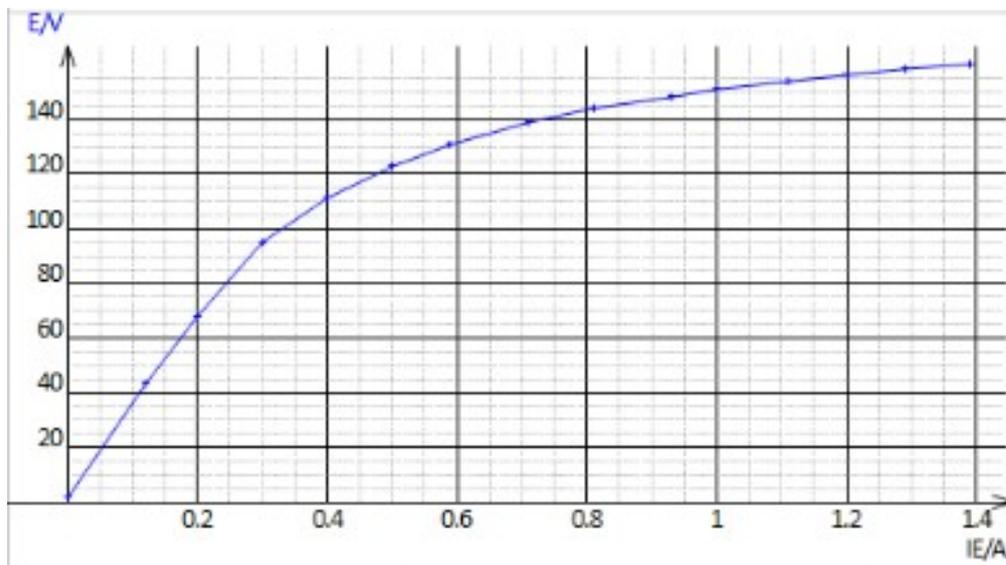
Cette caractéristique donne les variations de la tension à vide ($fem E$) en fonction du courant d'excitation (I_e).

Pour tracer la caractéristique à vide d'une machine, il faut que la machine fonctionne :

- en génératrice à vide,
- à excitation constante,
- à une vitesse / fréquence fixe.

Dans le paragraphe précédent, on a vu que la fem est proportionnelle au flux et à la vitesse de rotation.

La caractéristique à vide est donc l'image de la courbe d'aimantation de la machine.



courbe 3: Caractéristique à vide de la MS 1kW - vitesse 1000tr/min



2.6 - LE COURANT (INDUIT) DANS UNE GÉNÉRATRICE.

Induced current

Si le conducteur où est apparu la tension induite e est placé dans un circuit électrique fermé, alors il va circuler un courant induit.

Ce courant induit obéit à la loi de Lenz : « les courants induits essaient de s'opposer à la cause qui leur a donné naissance ».

Ceci explique que plus une génératrice fournira du courant (induit), plus elle exercera un couple résistant important sur son arbre.

2.7 - COURANTS DE FOUCAULT.

eddy current

Les courants de Foucault sont des courants induits qui se créent à l'intérieur des noyaux ferromagnétiques.

Ces noyaux, étant soumis à un flux variable, voient apparaître à leur extrémité une fem induite.

Ces noyaux étant conducteurs, s'il y a une tension, il y a un courant (de Foucault) qui circule DANS le noyau – on ne peut pas récupérer ces courants.

Ce sont les courants de Foucault qui permettent au rotor d'un MAS de tourner sous l'action du champ tournant créé par le stator.

Ils sont utilisés aussi dans les freins électromagnétiques.

[Vidéo : apparition des courants de Foucault.](#)

[Vidéo : une expérience montrant la différence d'effet entre la tension induite et les courants de Foucault.](#)

[Vidéo : une attraction qui a intérêt à bien freiner](#)



2.8 - LES PERTES FER.

Iron
loss

Un matériau ferromagnétique soumis à une variation de flux magnétique va se mettre à chauffer à cause des pertes fer.

Les pertes fer comprennent les pertes par hystérésis et celles par courants de Foucault.

On peut chercher à diminuer les pertes, mais on ne peut pas les éliminer.

LES PERTES PAR HYSTÉRÉSIS.

Lorsque le flux est variable, de façon périodique on magnétise le matériau (augmentation de B par apport d'énergie) puis on le démagnétise (diminution de B par libération d'énergie).

Ces 2 courbes étant séparées, cela veut dire que l'on récupère moins d'énergie que l'on en a apporté.

Les pertes par hystérésis dépendent :

- du matériau utilisé (largeur du cycle d'hystérésis)
- de la fréquence de variation du champ magnétique (fréquence d'alimentation des bobines et/ou vitesse de rotation)
- de l'intensité du champ magnétique – donc de l'excitation.

Pour limiter les pertes par hystérésis, on prend des matériaux à cycle d'hystérésis étroit.

LES PERTES PAR COURANTS DE FOUCAULT.

eddy
current

Les pertes par courants de Foucault sont les pertes Joule dues aux courants de Foucault.

Les pertes par courants de Foucault dépendent :

- de la résistivité du noyau ferromagnétique,
- de la longueur du parcours des courants de Foucault.

Pour limiter les pertes par courants de Foucault, on choisit des noyaux à forte résistivité et on les feuillette pour limiter le parcours des courants de Foucault.

On exploite les pertes par courant de Foucault dans le chauffage par induction.

[Vidéo : explication des pertes Fer ... dans une autre version](#)

[vidéo : pertes fer dans un transformateur : définition et réduction des pertes](#)

[Vidéo: chauffage d'une pièce métallique par induction](#)

2.9 - MODÉLISATION DES PERTES FER.

Les pertes fer dépendent la variation de flux, c'est à dire de l'excitation de la machine, de la vitesse de rotation et de la fréquence d'alimentation.

Dans le cas d'une machine fonctionnant à flux forcé (transformateur et MAS), le flux dépend de la tension.

Les pertes fer sont donc modélisées dans ces machines par une résistance soumise à la tension d'alimentation.

Cette résistance est placée en parallèle avec l'inductance magnétisante.

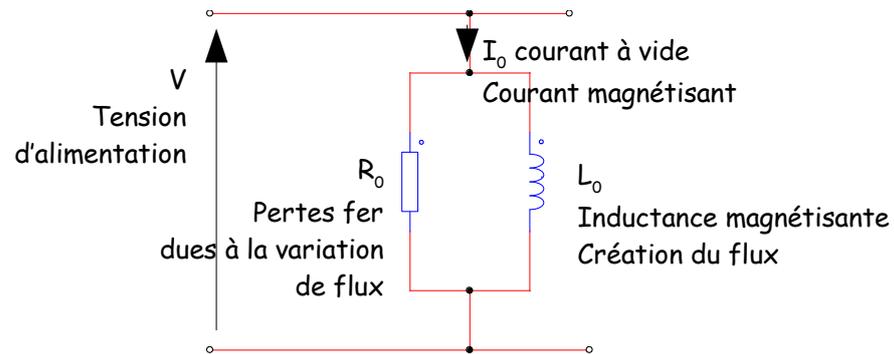


figure 1: Modélisation du circuit magnétique d'un transformateur ou MAS fonctionnant à flux forcé



2.10 - LA CRÉATION D'UN CHAMP MAGNÉTIQUE TOURNANT.

Comme on l'a vu dans la partie 2.2, pour obtenir un couple mécanique, les champs magnétiques doivent être de direction fixe ou tournants à la même vitesse.

Pour créer un champ tournant au stator, il faut que les bobines statoriques soient alimentées en courant sinusoïdal à une fréquence f .

[Vidéo : champ tournant triphasé](#)

[Vidéo : champ tournant monophasé](#)

[Vidéo : influence du nombre de paires de pôles](#)

CE QU'IL FAUT SAVOIR SUR LES CHAMPS TOURNANTS

Une bobine alimentée en monophasé crée 2 champs tournants de même intensité, de même vitesse mais tournants en sens opposé. Ceci explique qu'un moteur monophasé ne peut pas démarrer seul.

Pour lancer un moteur monophasé, il faut qu'il comporte un bobinage auxiliaire perpendiculaire au bobinage principal et alimenté par un courant déphasé de 90° par rapport au courant principal.

Le déphasage de 90° entre les courants est obtenu en plaçant en série avec le bobinage auxiliaire un condensateur « de démarrage ».

Un bobinage triphasé alimenté en triphasé crée un seul champ tournant.

Si une machine comporte 2 paires de pôles, alors en une période T d'alimentation du courant, le rotor ne fait qu'un demi tour. Le rotor met donc $2T$ pour faire 1 tour.

La vitesse du champ tournant est appelée vitesse de synchronisme n_s en tr/min.

On a la relation $60 \times f = n_s \times p$ où p est le nombre de paires de pôles.