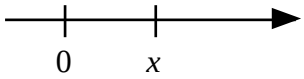
C31 - Convertisseurs d'énergie : généralités

Mécanique

• *Formulaire de mecanique élémentaire (rappels)*

Cinématique

TRANSLATION



longueur : x m

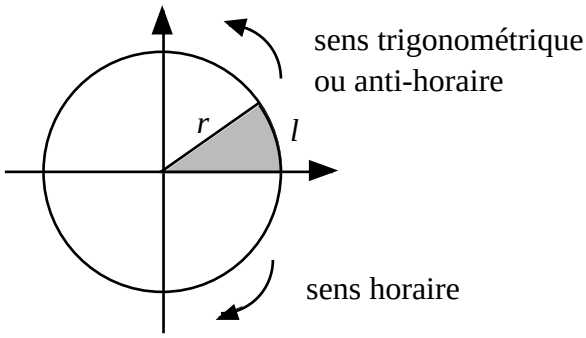
vitesse : $v = x' = \dfrac{dx}{dt}$ m/s

$\left(NB: \quad \bar{v} = \dfrac{\Delta x}{\Delta t} \right)$

accélération : $a = x'' = \dfrac{dv}{dt} = \dfrac{d^2x}{dt^2}$ m/s^2

$\left(NB: \quad \bar{a} = \dfrac{\Delta v}{\Delta t} \right)$

ROTATION



angle : $\theta = \dfrac{l}{r}$ rad

vitesse angulaire : $\Omega = \theta' = \dfrac{d\theta}{dt}$ rad/s

$\left(NB: \quad \bar{\Omega} = \dfrac{\Delta\theta}{\Delta t} \right)$

1 rpm = 1 tr/mn = $\dfrac{2\pi}{60}$ rad/s ≈ 0,1 rad/s

1 rad/s = $\dfrac{60}{2\pi}$ tr/mn ≈ 10 tr/mn

acc. angulaire : $\theta'' = \Omega' = \dfrac{d\Omega}{dt} = \dfrac{d^2\theta}{dt^2}$ rad/s^2

$\left(NB: \quad \bar{\theta''} = \dfrac{\Delta\Omega}{\Delta t} \right)$

Dynamique

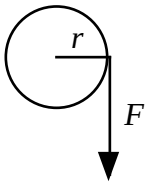
force : $\vec{F} = m.\vec{a}$ N

travail : $W = \vec{F}.\vec{l}$ J

puissance : $P = \dfrac{\Delta W}{\Delta t} = \vec{F}.\vec{v}$ W

(moyenne)

couple : $C = J.\theta'' = J.\dfrac{d\Omega}{dt}$ Nm



J = moment d'inertie (kg.m^2)

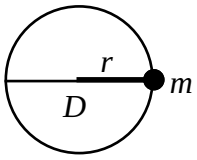
$C = F.r$

travail : (moyen) $W = C.\theta$ J

puissance : (moyenne) $P = \dfrac{\Delta W}{\Delta t} = C.\Omega$ W

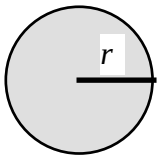
Moment d'inertie (dynamique de rotation)

point matériel $J = m.r^2 = m.\dfrac{D^2}{4}$

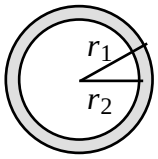


kg.m^2

cylindre plein $J = \dfrac{m.r^2}{2}$



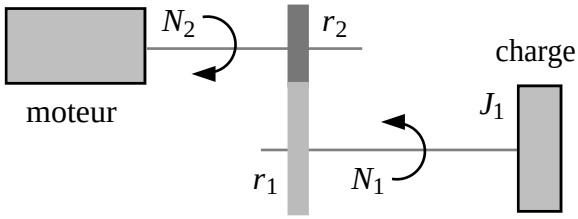
cylindre creux $J = m.\dfrac{r_1^2 + r_2^2}{2}$



réducteur

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{r_1}{r_2}$$

$$J_2 = J_1\left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2$$



(J_2 représente l'inertie de la charge ramenée sur l'arbre moteur)

• *Point de fonctionnement d'un ensemble { moteur et charge }*

1- *Couple moteur C_m*

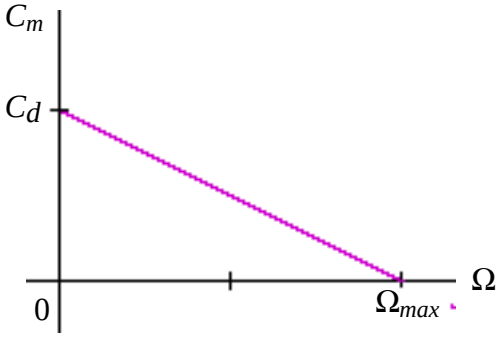
Le couple moteur varie selon le point de fonctionnement adopté. On distingue notamment :

1a- le couple nominal C_n

1b- le couple de démarrage C_d. En général, $C_d > C_n$ (par exemple $C_d = 1{,}6.\ C_n$)

La relation $C_m(\Omega)$ est appelée "caractéristique statique" du moteur. Par exemple :

⚠ En général, le couple moteur diminue avec la vitesse. Mais il y a des exceptions, au moins sur une partie de la caractéristique de couple du moteur (exemple : moteur asynchrone) !



2- *Couples résistants et puissances requises*

2.1- *Couple résistant statique $C_r = C_f + C_c$*

2.1.1- Couple dû aux frottements : C_f

2.1.1a- frottements secs : $C_f = c^{te}$ ($\forall\ \Omega$) $\Leftrightarrow P = C_f.\Omega$

2.1.1b- frottements visqueux à basse vitesse (ex. : pompe) : $C_f = f_1.\Omega$ $\Leftrightarrow P = f_1.\Omega^2$

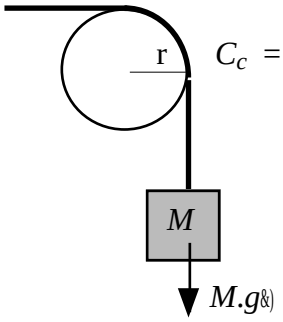
f_1 : coefficient de frottement visqueux dû à un écoulement laminaire des fluides

2.1.1c- frottements visqueux à haute vitesse (ex. : ventilateur) : $C_f = f_2.\Omega^2 \Leftrightarrow P = f_2.\Omega^3$

f_2 : coefficient de frottement visqueux dû à un écoulement turbulent des fluides (en réalité l'exposant peut être > 2 pour des très grandes vitesses)

2.1.2- Couple dû à la charge entraînée : C_c

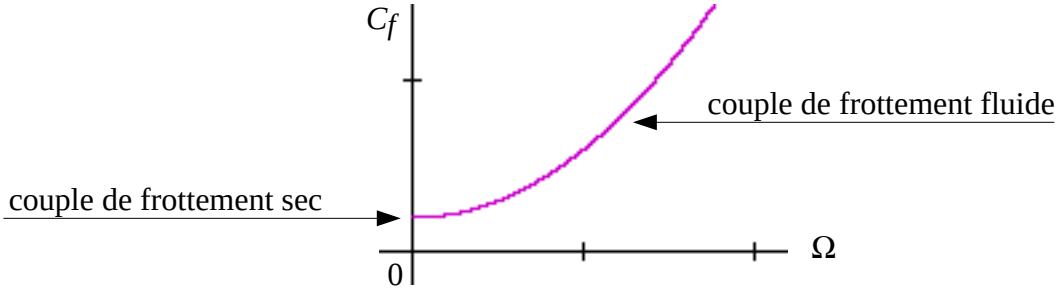
Exemple : engin de levage :



$C_c = r.M.g$

$\Delta h \quad \Leftrightarrow P = \dfrac{\Delta W}{\Delta t} = Mg\dfrac{\Delta h}{\Delta t}$

La relation $C_f(\Omega)$ est appelée "caractéristique statique" de la charge. Par exemple :



2.2- *Couple résistant dynamique C_a (couple d'accélération, couple de freinage)*

C'est le couple résistant dû aux variations de vitesse (accélération et freinage) : $C_a = J.\dfrac{d\Omega}{dt}$

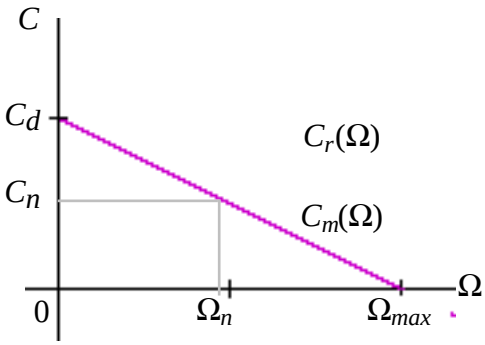
NB : dans le cas d'une variation linéaire de la vitesse au cours du temps ($\Omega = a.t + b$), cette relation se simplifie en $C_a = J.\dfrac{\Delta\Omega}{\Delta t}$

3- *Fonctionnement*

3.1- *Point de fonctionnement statique*

Il se trouve à l'intersection des deux caractéristiques statiques. Le fonctionnement nominal est défini par C_n , Ω_n :

Ω_n : vitesse nominale
C_n : couple nominal, tel que :
$C_n = C_m(\Omega_n) = C_r(\Omega_n)$



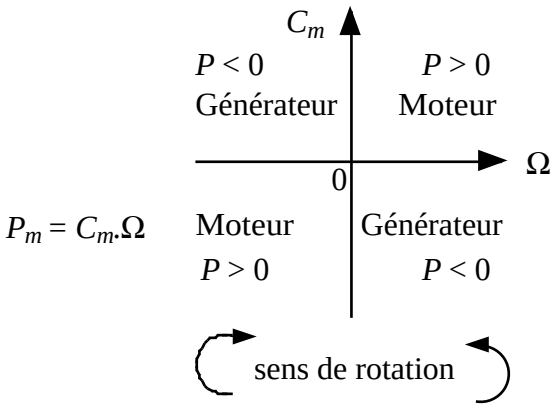
3.2- *Fonctionnement dynamique*

Il est défini par l'équation différentielle : $C_m = C_a + C_r = J.\dfrac{d\Omega}{dt} + C_r$

4- *Puissance mécanique*

5- *Régulation*

Fonctionnement dans les 4 quadrants :



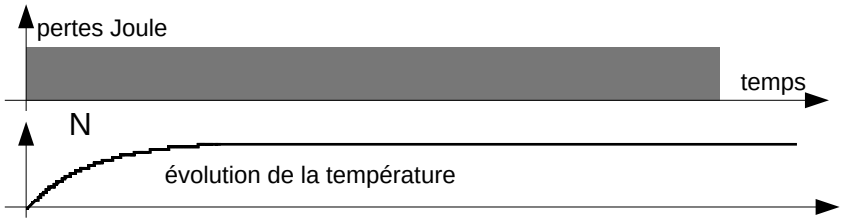
Selon les utilisations, on rencontre trois types de régulation :
- régulation de vitesse (Ω) : la plus courante
- régulation de couple (C_m)
- régulation de puissance (P_u)

6- *Service*

Concerne la maintenance des machines, du point de vue de l'échauffement et de la fiabilité (norme CEI 34-5). Le service est défini selon le mode de fonctionnement. Pour les services S3, S4 et S5, on définit également le *facteur de marche* (= rapport cyclique de la mise sous tension).

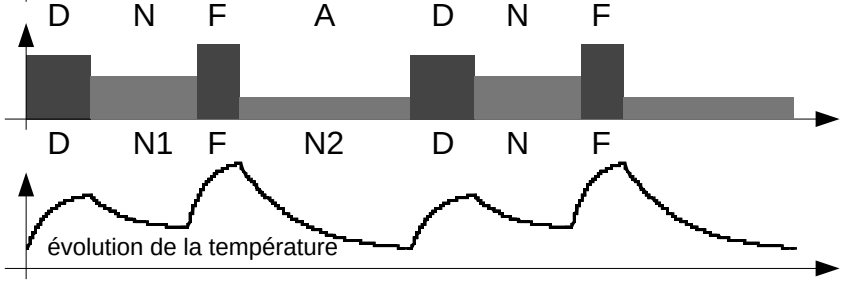
Exemples :

Service continu



Service intermittent périodique

Service ininterrompu périodique



D : démarrage
N : fonctionnement nominal
F : freinage
A : arrêt
V : fonctionnement à vide

Norme NF C51-100 :

S1	service continu	N
S2	service temporaire	N court - A long
S3	service intermittent périodique	cycles N-A
S4	service intermittent à démarrage	cycles D-N-A
S5	service intermittent à démarrage et freinage électrique	cycles D-N-F-A
S6	service ininterrompu à charge intermittente	cycles N-V
S7	service ininterrompu à démarrage et freinage	cycles D-N-F
S8	service ininterrompu à changement de vitesse périodique	cycles N1-N2-...

7- *Classe d'isolation thermique*

classe d'isolation thermique (norme NFC 51-111)	Y	A	E	B	F	H	C
échauffement maximal (si température ambiante ≤ 40°C) °C	45	60	75	80	100	125	-
température maximale d'emploi °C	90	105	120	130	155	180	> 180

Capteurs de vitesse et de position pour mouvement rotatif

(*Résumé.* Pour plus de détails, cf cours d'instrumentation)

• *Capteurs de vitesse*

- *Dynamo tachymétrique*

Une dynamo tachymétrique est une machine à courant continu fonctionnant en génératrice (cf §C32). La tension qu'elle fournit vaut : $e = k_{DT}\,\Omega$, où k_{DT} est la constante de cette machine. Mais à cause du collecteur, cette tension est en général ondulée, et il est nécessaire de la filtrer à l'aide d'un condensateur externe. Si on appelle r la résistance d'induit de la dynamo, le filtre qui en résulte est un filtre rC passe-bas. Cette solution a cependant pour inconvénient d'ajouter dans un système de régulation de vitesse d'une machine tournante une constante de temps supplémentaire $\tau = rC$.

- *Codeur optique incrémental*

Un codeur optique incrémental est constitué d'un disque supportant une unique piste marquée de fentes alternativement opaques et réfléchissantes (ou transparentes), éclairée par un faisceau lumineux émis par une LED et qu'une photodiode analyse.

Le signal délivré par la photodiode est de fréquence proportionnelle à la vitesse. Un comptage pendant une période donnée (= fréquencemètre) fournit la mesure de la vitesse sous forme numérique. On peut aussi associer un filtre passe-bas à un monostable pour délivrer un signal de mesure analogique.

NB : si on veut en outre connaître le sens de rotation, une deuxième piste est nécessaire, décalée par rapport à la première.

• *Capteurs de position*

- *Codeur optique incrémental adapté à la mesure de position* (résolution → 3000 points/tours)

Ce codeur comporte une piste supplémentaire à fenêtre unique, qui permet d'avoir une référence de position (dite "top-zéro"). Il présente cependant des inconvénients, liés à la nécessité de réinitialiser le comptage chaque fois qu'une erreur est commise pour diverses raisons.

- *Codeur optique absolu* (résolution → 2^{12} à 2^{13} points/tours)

Un codeur absolu à n bits comporte un disque sur lequel sont imprimées n pistes représentant sous forme graphique le code Gray (cf §B11). Ces pistes sont éclairées par des faisceaux lumineux émis par une barette de LEDs que des photodiodes analysent.

- *Résolver* (précision → 1' d'angle)

Un synchro-résolveur est un transformateur tournant constitué d'un rotor bobiné et d'un stator comprenant deux enroulements en quadrature. Le rotor est alimenté par un courant sinusoïdal HF. On récupère sur le stator deux tensions alternatives modulées en amplitude selon la position de l'arbre, d'amplitudes $k\sin\theta$ et $k\cos\theta$, à partir desquelles un signal analogique proportionnel à θ est élaboré par un circuit intégré spécialisé.

- *Capteur de déplacement rotationnel* (précision → 0,1%)

Le plus simple (mais le moins précis) des capteurs de position est un potentiomètre rotatif à résistance linéaire monté en pont potentiométrique.

Electromagnétisme

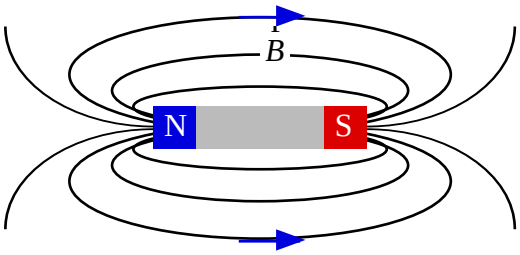
• *Champ magnétique*

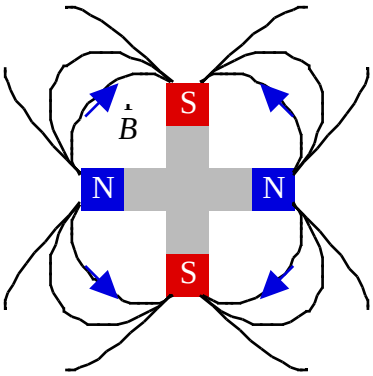
Définitions. Un aimant est un dipôle magnétique. On appelle "pôle Nord" de l'aimant l'extrémité qui se dirige vers le pôle Nord magnétique terrestre (cas d'une aiguille aimantée tournant librement sur son axe). L'autre extrémité de l'aimant est le "pôle Sud".

NB : le pôle Nord magnétique, situé dans l'Arctique, est distinct du pôle Nord géographique et se déplace au cours du temps (à une vitesse d'environ 40 km/an actuellement).

Le champ magnétique $\vec{B}$ est un vecteur orienté du pôle Nord vers le pôle Sud de l'aimant le long d'une "ligne de champ". Son intensité s'exprime en Tesla (T), anciennement en Gauss (1T = 10^4G).

Champ dipolaire (aimant simple) : Champ quadripolaire (nb de paire de pôles : p = 2) :





Intensité. Intensité totale du champ magnétique terrestre (France) : ≈ 45 µT

Aimants permanents : qq 10^{-2} à 10^{-1} T

Machines électriques : ≈ 1T

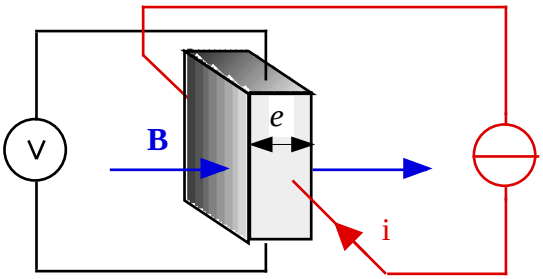
Aimants supraconducteurs : > 30 T

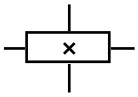
Etoile à neutrons : jusqu'à 10^9 T !

Mesure par sonde semiconductrice à effet Hall Symbole

Effet Hall : $V = k_H \dfrac{B.i}{e}$

k_H : coefficient de Hall, caractéristique du semiconducteur





• *Champ magnétique créé par un courant électrique*

Le champ magnétique traduit l'effet (relativiste) des déplacements dans l'espace-temps de charges électriques les unes par rapport aux autres...

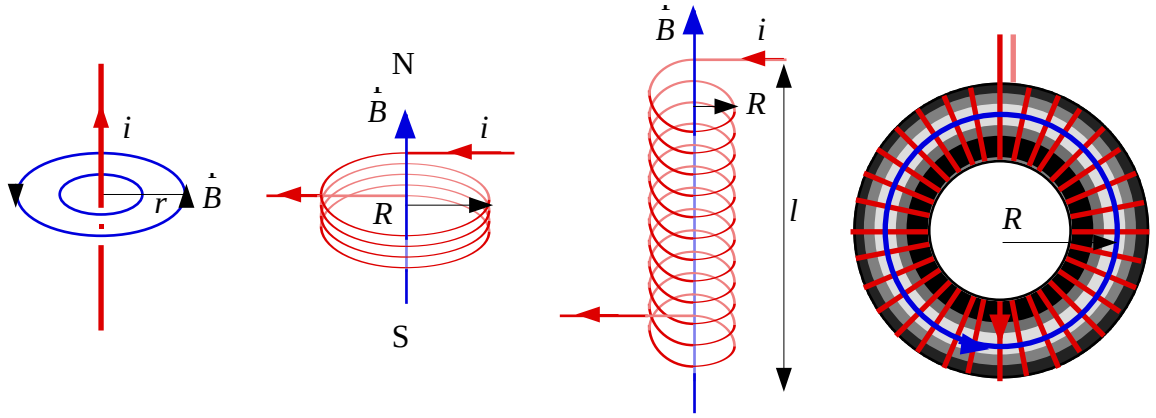
Dans le vide (ou dans l'air), un courant électrique crée un champ magnétique $\vec{B}$ dans l'espace environnant. On pose :

$\vec{B} = \mu_0 \vec{H}$ $\vec{B}$ champ "d'induction" magnétique

$\vec{H}$ champ "d'excitation" magnétique

$\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ uSI μ_0 perméabilité magnétique du vide

Conducteur filiforme rectiligne infini	Bobine plate *n* spires	Solénoïde *n* spires ($R << l$)	Tore *n* spires

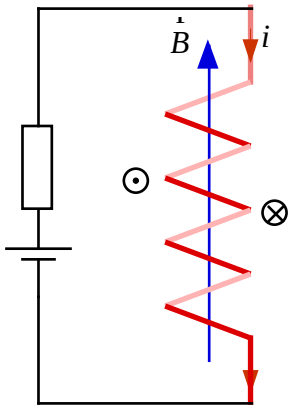


$B = \mu_0 \dfrac{i}{2\pi r}$	$B = \mu_0 \dfrac{n.i}{2R}$	$B = \mu_0 \dfrac{n.i}{l}$	$B = \mu_0 \dfrac{n.i}{2\pi R}$
à une distance r du fil	au centre de la bobine		à l'intérieur du tore

NB : dans le cas d'une bobine, on voit que si l'on pose $B = \mu_0 H$, la quantité H est homogène à des A/m et est proportionnelle à ni, quantité appelée *"ampères-tours"*.

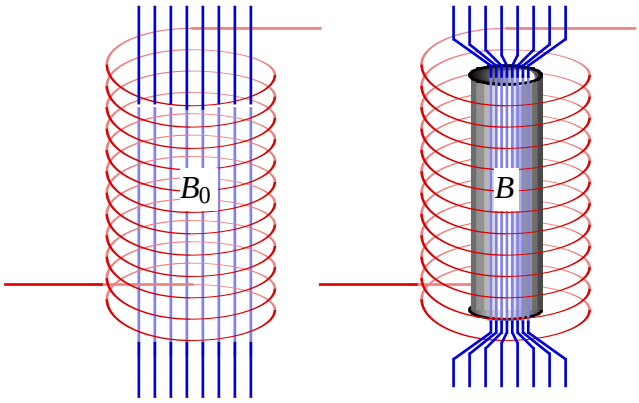
Orientation du champ dans une bobine :

"Règle de la main droite" :
Le pouce indique la direction du champ si...
...les autres doigts sont placés dans le sens de circulation du courant



• ***Matériaux ferromagnétiques***

Le champ B_0 à l'intérieur d'un solénoïde placé dans l'air est uniforme.
Si l'on introduit un barreau en matériau ferromagnétique à l'intérieur du solénoïde, celui-ci concentre les lignes de champs. Il en résulte à l'intérieur du barreau un champ $B >> B_0$.
On pose : $B = \mu_r B_0 = \mu_0 \mu_r H$
μ_r : perméabilité magnétique relative du matériau par rapport au vide.

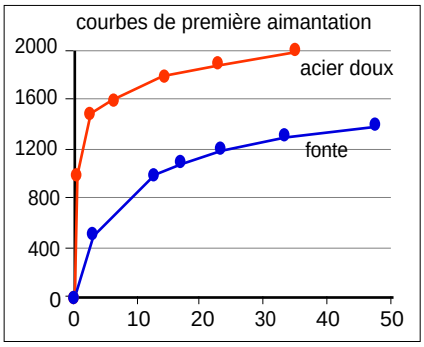


Pour l'air, $\mu_r = 1$. Dans le cas général le coefficient μ_r, qui décrit une propriété de la matière au niveau atomique, n'est pas constant. Il dépend :

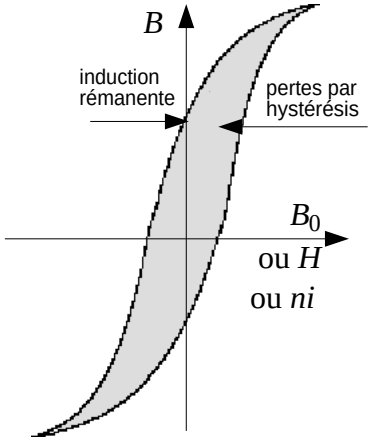
- de l'intensité de l'induction du champ magnétisant B_0, donc des ampères-tours.
- de l'ordre d'exécution des opérations de magnétisation. Cet effet de mémoire se traduit par un cycle hystérésis.

Exemple (B_0 et B en mT) :

Acier doux			Fonte		
Bo	B	µr	Bo	B	µr
0	0		0	0	
0,625	1000	1600	2,9	500	172
2,5	1500	600	12,5	1000	80
6,25	1600	256	17	1100	65
14	1800	129	23	1200	52
22,5	1900	84	33	1300	39
35	2000	57	47,5	1400	29



cycle d'hystérésis



Matériau magnétique parfait : par définition, matériau sans hystérésis et pour lequel $\mu_r = c^{te}$: la courbe d'aimantation du matériau est linéaire. En outre, on considère que le matériau magnétique concentre *toutes* les lignes de champ dans sa masse. Dans ce cas, on dit que les fuites magnétiques sont nulles.

Induction rémanente : lorsque l'on cesse de soumettre le barreau ferromagnétique au champ d'induction créé par le solénoïde (cf expérience ci-dessus), soit $ni = 0$, il subsiste un champ magnétique rémanent : le barreau reste aimanté.

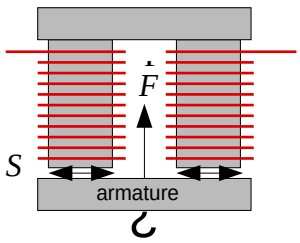
Pertes par hystérésis : un matériau magnétique qui subit l'action d'une induction alternative s'échauffe et l'échauffement est proportionnel à l'aire du cycle d'hystérésis.

On choisit donc pour les machines tournantes des matériaux à cycle d'hystérésis étroit.

Electro-aimants : dans ce cas particulier, pour obtenir une induction rémanente élevée, on choisit au contraire des matériaux à cycle d'hystérésis large. Applications :

Force portante d'un électro-aimant :

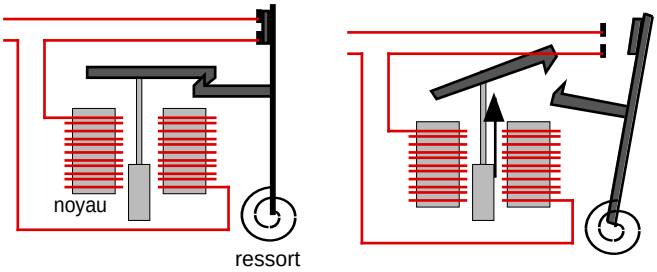
(S [m^2] : surface de contact)



$$F = \frac{B^2 S}{2\mu_0} \quad [\text{N}]$$

Disjoncteur (cf §C12)

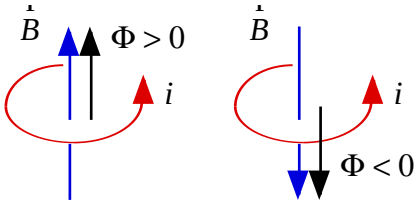
$I < I_n$ $I > I_n$



• *Flux*

Flux d'un champ uniforme à travers une spire dont la surface est perpendiculaire aux lignes de champ : $\Phi = B.S$ [Wb webers].

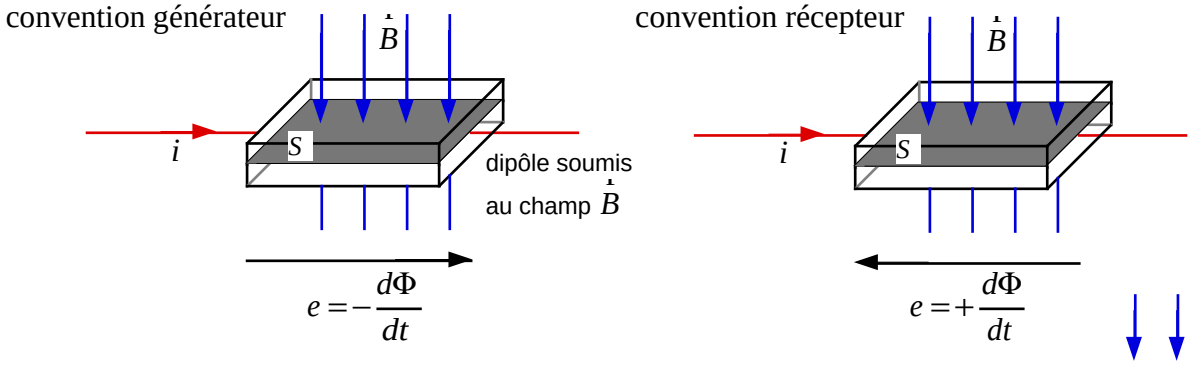
On considère une spire parcourue par un courant i et plongée dans un champ magnétique $\vec{B}$. Le signe du flux est donné par la règle de la main droite : si le champ qui traverse la spire est dans le sens indiqué par le pouce, alors le flux est positif (négatif dans le cas contraire).



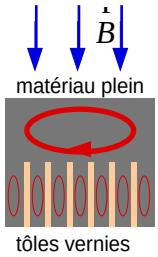
Flux variable au cours du temps (loi de Faraday) :

Le flux $\Phi = B.S$ traversant un dipôle électrique peut varier au cours du temps, soit parce que le champ magnétique $\vec{B}$ est lui-même variable (ex. : circuit électrique fonctionnant en alternatif), soit

parce que le dipôle et le champ sont en mouvement relatif l'un par rapport à l'autre (S variable : cas d'une machine). Il existe alors aux bornes du dipôle une fem e telle que :



Pertes par courants de Foucault : pertes Joule dûes aux courants induits dans le circuit magnétique. Pou diminuer ces pertes, les circuits magnétiques sont feuilletés, constitués d'un empilement de tôle recouvertes d'un vernis isolant.

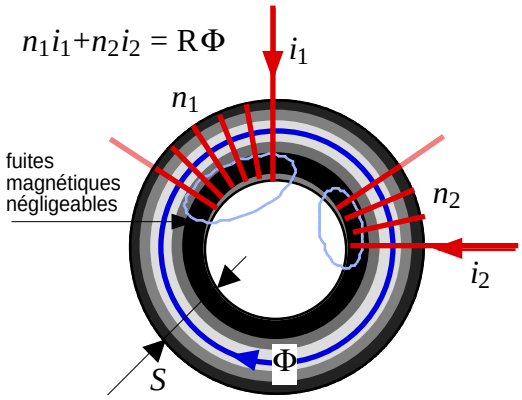


• ***Circuit magnétique parfait***

On considère un enroulement de n spires en forme de tore ou de solénoïde de grande longueur, bobiné sur un matériau linéaire de section S constante.

Il vient : $\Phi = BS = \mu_0\mu_r \frac{ni}{l} S \Rightarrow ni = \underbrace{\frac{l}{\mu_0\mu_r S}}_{\mathrm{R}} \Phi$.

On appelle *réluctance* la quantité notée R .

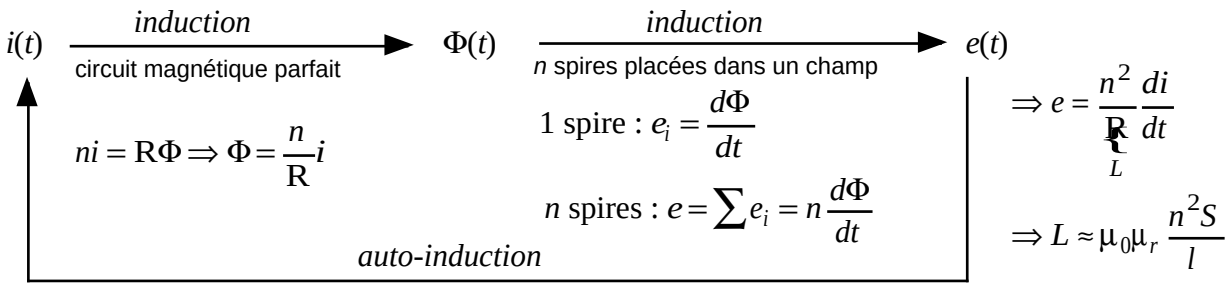


Analogie entre électrocinétique et magnétisme :

Force électromotrice :	E	V	$\rightarrow$	Force magnétomotrice :	$\mathrm{E} = ni$	A/m
Courant électrique :	i	A	$\rightarrow$	Flux :	Φ	Wb
Résistance :	$R = \rho \frac{l}{S}$	Ω	$\rightarrow$	Réluctance :	$\mathrm{R} = \frac{1}{\mu_0\mu_r}\frac{l}{S}$	H^{-1}
Ddp électrique :	$U = Ri$	V	$\rightarrow$	Ddp magnétique :	$\mathrm{U} = \mathrm{R}\Phi$	A/m

Les lois habituelles de l'électrocinétique (loi des mailles, loi des nœuds, résistances en série, en parallèle,...) sont transposables aux circuits magnétiques parfaits en substituant les grandeurs magnétiques aux grandeurs électriques.

• ***Auto-induction ; inductance d'une bobine parfaite***



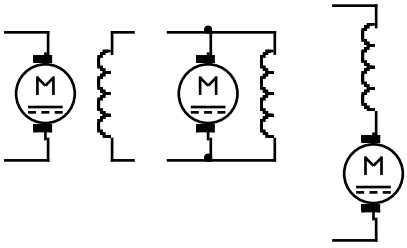
Machines electriques : généralités

• *Classification*

Champ fixe, bobinage tournant (Rotor)
Moteur à Courant Continu

Stator à aimant permanent — Stator bobiné (Inducteur)

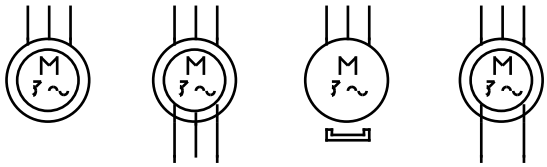
excitation séparée — excitation shunt — série



Champ tournant, bobinage fixe (Stator)
Moteur à Courant Alternatif

Rotor passif : Moteur asynchrone — Rotor actif : Moteur synchrone

à cage d'écureuil — à bagues — à aimant permanent *(brushless)* — à bagues

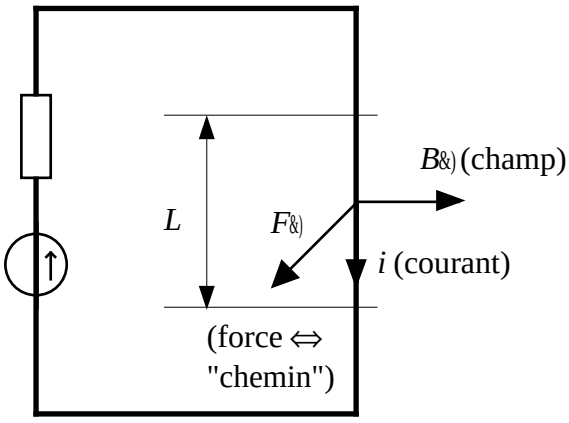


mot. à collecteur (monophasé) — Moteur Pas à Pas

• *Modèle électrique d'une marchine tournante*

Machine fonctionnant en moteur

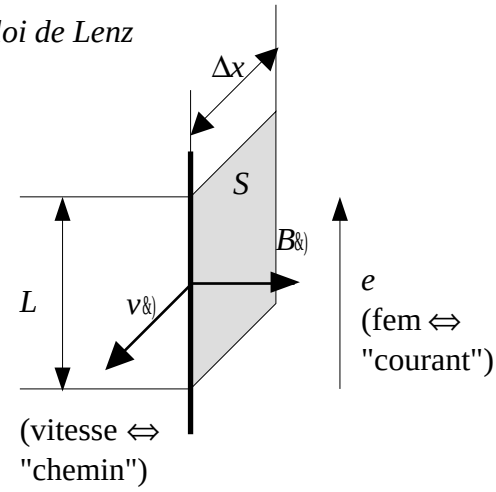
loi de Laplace



$$F = B.L.i$$

Machine fonctionnant en génératrice

loi de Lenz

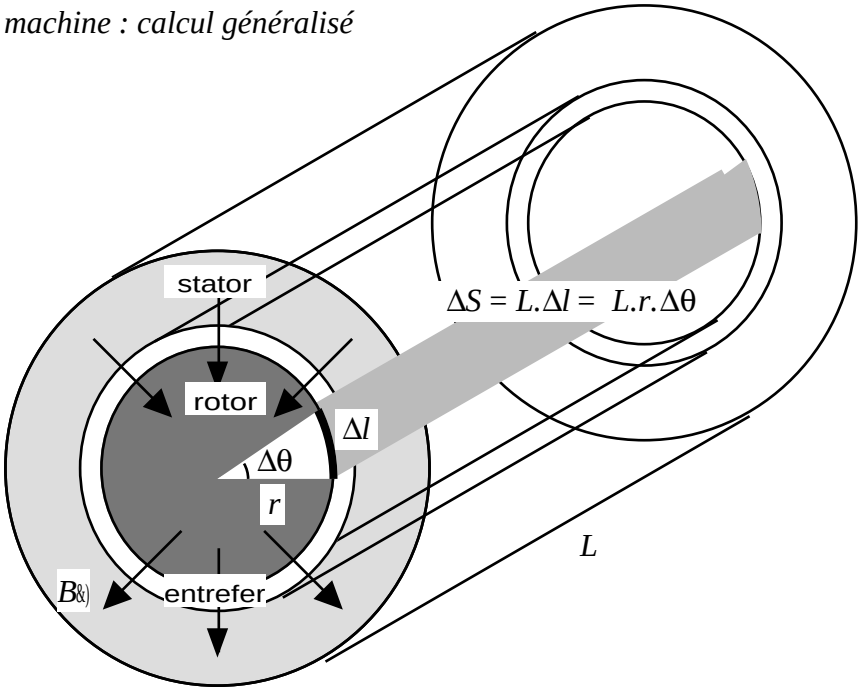


$$e = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = \frac{B.S}{\Delta t} = \frac{B.L.\Delta x}{\Delta t} = B.L.v$$

Règle des trois doigts : champ / chemin / courant = pouce / index / majeur :

Moteur : main droite Génératrice : main **G**auche (**G** = **G**énérateur)

Fem ou fcem dans un machine : calcul généralisé



L'action d'un champ magnétique exercée sur un bobinage en mouvement par rapport au champ est la même quel que soit le référentiel adopté :

<u>Bobinage tournant / champ fixe</u> <u>Champ tournant / bobinage fixe</u>

Pendant un instant Δt :

le bobinage tourne d'un angle $\Delta\theta$ le champ tourne d'un angle $\Delta\theta$

et parcourt une distance $\Delta l \approx r.\Delta\theta$

Par rapport à un brin conducteur de longueur L :

la surface balayée par le brin vaut : la surface "balayée" par le champ vaut :

$$\Delta S = L.\Delta l = L.r.\Delta\theta,$$

et le flux du champ coupé par cette surface vaut :

$$\Delta\Phi = B.\Delta S.$$

Selon la loi de Lenz on a donc :

$$E = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = \frac{B.\Delta S}{\Delta t} = \frac{B.L.r.\Delta\theta}{\Delta t}$$

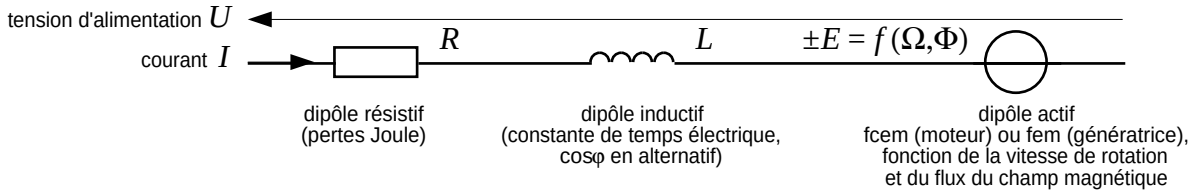
La surface totale de l'entrefer vaut $S = 2\pi\, r.L.$ Donc :

$$E = \frac{1}{2\pi}.\frac{B.L.2\pi r.\Delta\theta}{\Delta t} = \frac{1}{2\pi}.\frac{B.S.\Delta\theta}{\Delta t}$$

En généralisant ce calcul, soit k une constante dépendant uniquement du type de moteur et de sa géométrie (ici, dans ce calcul idéalisé, $k = 1/2\pi$). Le flux total du champ dans l'entrefer est $\Phi = B.S.$

Il vient : $$E = k.\frac{\Phi.\Delta\theta}{\Delta t} = k.\Phi.\Omega = K.\Omega$$

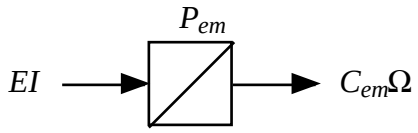
On en déduit un modèle électrique général, qui tient compte de ce qu'on peut observer pour toute machine tournante vue comme un dipôle actif récepteur (moteur) ou générateur (génératrice) :



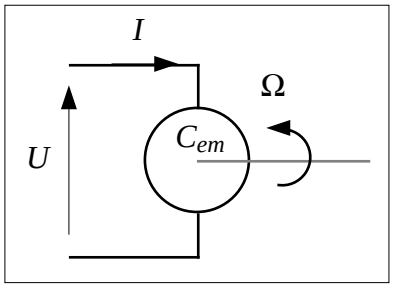
• *Conversion electromécanique*

Conversion electromécanique parfaite :

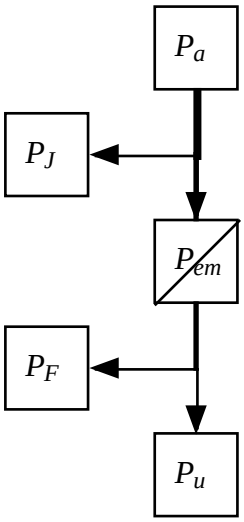
P_{em} : puissance électromagnétique
C_{em} : couple électromagnétique
$P_{em} = E.I = C_{em}.\Omega$



Conversion electromécanique réelle :



Bilan des puissances



$P_a = U.I$: puissance électrique absorbée

$P_J = R.I^2$: pertes Joule électriques

$P_{em} = EI = C_{em}.\Omega$: conversion électromécanique parfaite

P_F = "pertes Fer" : hystérésis + courants de Foucault + frottements

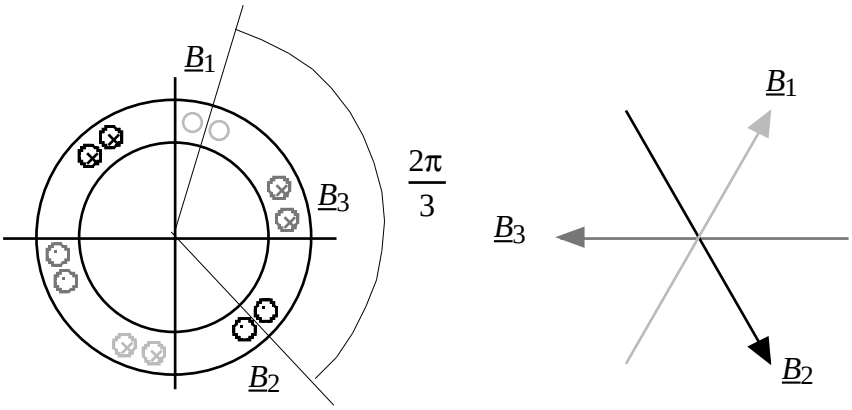
$P_u = C_u.\Omega$: puissance utile = couple utile x vitesse

rendement : $\eta = \dfrac{P_u}{P_a}$

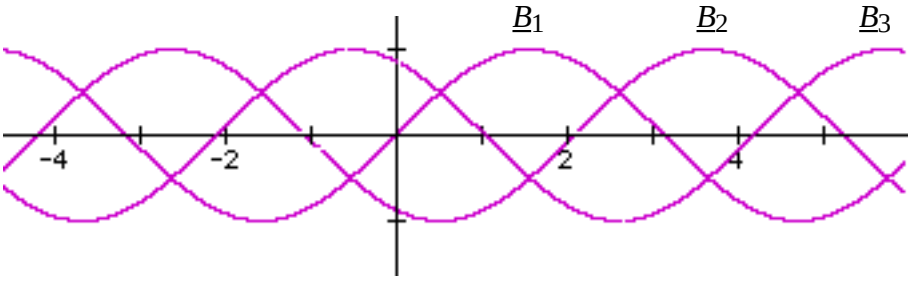
• *Champs tournants triphasés : principe*

a) décalages géométriques :

Soient 3 enroulements dont les bobinages sont répartis symétriquement le long d'un cercle.



b) décalages temporels : ces 3 enroulements reçoivent 3 courants déphasés entre eux de 2π/3.

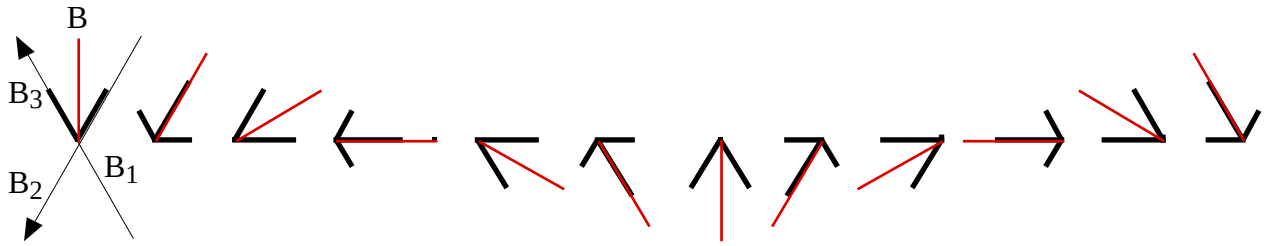


$$B_1 = k.I.\sin \omega t$$

$$B_2 = k.I.\sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$B_3 = k.I.\sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right)$$

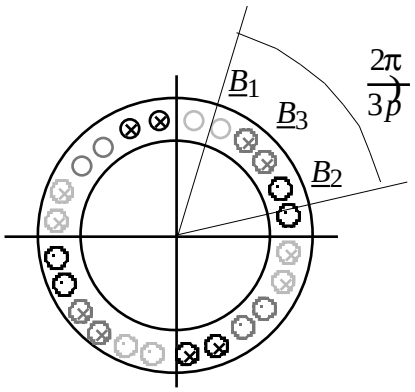
c) résultat : il en résulte un champ global $\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + \vec{B}_3$ qui tourne dans l'espace. Cette rotation est figurée ci-dessous par pas de π/6 . La vitesse de rotation du champ est $\Omega_s = \omega$ rad/s.



d) Vitesse de rotation du champ ou *"vitesse de synchronisme"* (cas d'un bobinage multipolaire) :

$$\Omega_s = \frac{\omega}{p} \quad \text{ou} \quad n_s = \frac{f}{p}$$

p	nb de paires de pôles
$\omega = 2\pi f$	pulsation des courants (rad / s)
f	fréquence des courants (Hz)
$\Omega_s = 2\pi n_s$	vitesse de synchronisme en rad / s
n_s	vitesse de synchronisme en trs / s



• ***Plaques signalétiques des machines : exemples***

Machine CC

Type	MCC	XXXXX	mot. c. continu & ref
KW	0,3		puissance utile
min-1	1500	(rpm ou tr/min)	vitesse nominale
U	230	A 2,15	induit (rotor)
U	230	A 0,17	excitation (stator)
IP	23		indice de protection
Cl	F		classe d'isolation thermique
serv	S1		service
kg	9		masse

Machine CA

Type	MAS	XXXXX	mot. asynchrone & ref
~	3		triphasé
KW	0,83		puissance utile
min-1	1400	(rpm ou tr/min)	vitesse nominale
V Δ	230	A 2,9	branchement triangle
V Y	400	A 1,65	branchement étoile
cos φ	0,88		facteur de puissance
Hz	50		fréquence nominale
IP	55		indice de protection
Cl	F		classe d'isolation thermique
serv	S1		service
kg	1,25		masse