CHAPITRE 1

L'Energie et les variables énergétiques

1-1 Définitions

1-1-1 Energie

Grandeur caractérisant un système et exprimant sa capacité à modifier l'état d'autres systèmes avec lesquels il entre en intéraction–magnétique–chimique………..

Autrment dit, L'énergie est la capacité de faire un travail.

Exemples: - Energie cinétique d'une masse en mouvement

- Energie potentielle d'un poids soulevé ou d'un ressort comprimé

L'énergie est un concept de base de la physique, car un système isolé a une énergie totale constante (principe de Lavoisier), il ne peut donc y avoir création ou disparition d'énergie, mais seulement transformation d'une forme en une autre ou transfert d'énergie d'un système à un autre.

Toute converstion d'énergie s'accompagne de pertes. Celles-ci sont particulierement importantes dans la conversion d'énergie thermique en énergie mécanique (Centrale Electrique, Voiture, ….)

Exemple1: Transformation d'énergie dans une centrale thermique:

Energie chimique (Gaz) $\longrightarrow$ Energie thermique (combustion gaz-air) $\longrightarrow$ Energie cinétique (Flux des gaz chauds) $\longrightarrow$ Energie mécanique (rotation de l'arbre turbo-compresseur) $\longrightarrow$ Energie Electrique (Générateur)

Exemple2: Effet d'une pille électrique sur l'ensemble (Ampoule-Environnement)

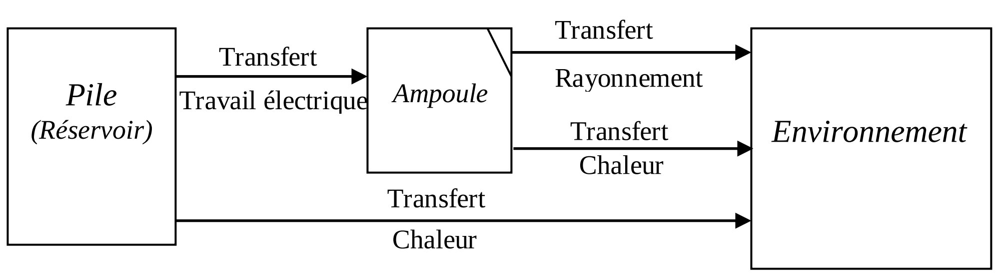


Figure 1*: Exemple de transferts énergétiques*

1.1.2 Puissance :

La puissance est le débit d'énergie qui a lieu lors d'une conversion (P=dE/dt), avec P la puissance en [W ou kW], E l'énergie [J ou kWh] et t le temps [s ou h].

Si l'énergie caractérise le service énergétique rendu (travail, éclairage, …), la puissance caractérise la capacité du convertisseur à transformer plus ou moins vite l'énergie.

Exemples :

*Un moteur électrique de 20 kW transforme une même quantité d'énergie électrique deux fois plus rapidement qu'un moteur de 10 kW

*Obtenir 10 kWh de chaleur sous un rayonnement solaire de 1 kW/m^2, dépend de la puissance du capteur solaire :

Un capteur de surface 1m^2 de capteur solaire idéal (1 kW) demandera 10 heures

Un capteur de surface 5 m^2 (plus puissant) ne nécessiteraient que deux heures dans les mêmes conditions.

1.2 Formes d'énergie

1.2.1 Principes de conversion énergétique

L'homme utilise l'énergie sous forme de chaleur, de lumière, ou de mouvement. La maitrise de l'énergie est donc le moteur de l'activité humaine qui doit la produire,stocker, et transporter, ce que certaines formes d'énergie permettent mieu que les autres. Pour ces raisons, il peut être conduit à *transformer* l'énergie.

La découverte de l'électricité a ainsi constitué une révolution!?.....Toutes les formes connues d'énergies peuvent être transformé en énergie électrique.

L'électricité est produite presque à 100% dans des centrales, par une conversion mécanique électrique au moyen d'alternateurs.

Elle est ensuite transformée et distribuée par un réseau extrêment dense composé de lignes aériennes et de cables souterrains.

Le principal inconvénient de l'énergie électrique est qu'elle ne peut pas être stockée directement en grandes quantités. L'énergie produite doit être immédiatement consommé. Plus exactement, les producteurs d'électricité mettent à disposition exactement la quantité d'énergie électrique nécessaire pour satisfaire la consommation à chaque instant.

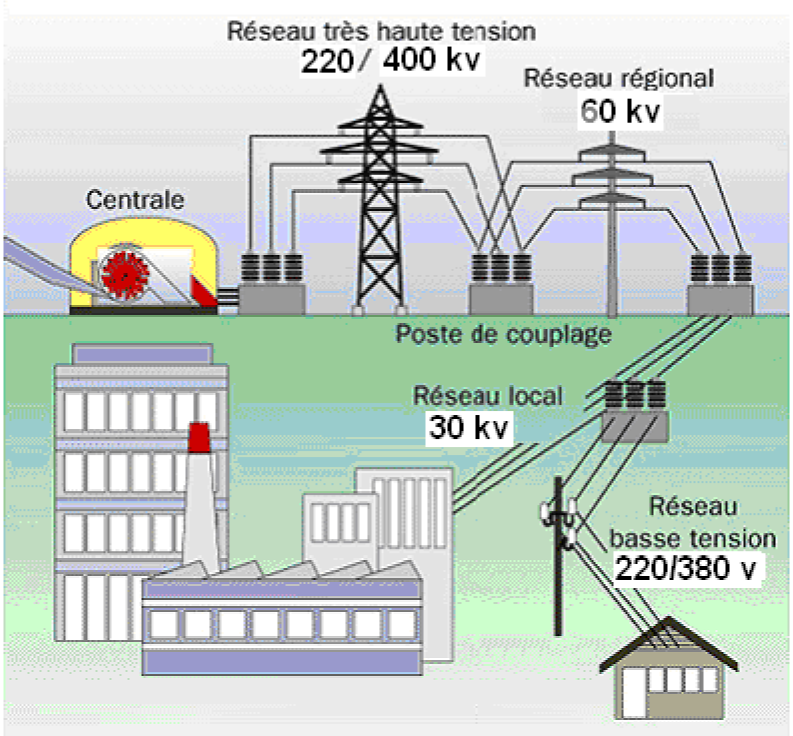


Figure 2*: Production,transport, et distribution de l'énergie électrique*

Toute conversion d'énergie se fait par le principe de la conservation de l'énergie : Dans un système donné, l'énergie totale reste constante. L'énergie peut prendre différentes formes. La conversion d'une forme en une autre est réalisée par différents processus naturels ou artificiels. Presque tous les processus de conversion d'énergie ont un rendement limité. Cela signifie que seule une partie de l'énergie fournie et convertie en énergie utile, la différence étant dissipée sous forme de chaleur, c'est-à-dire d'énergie thermique.

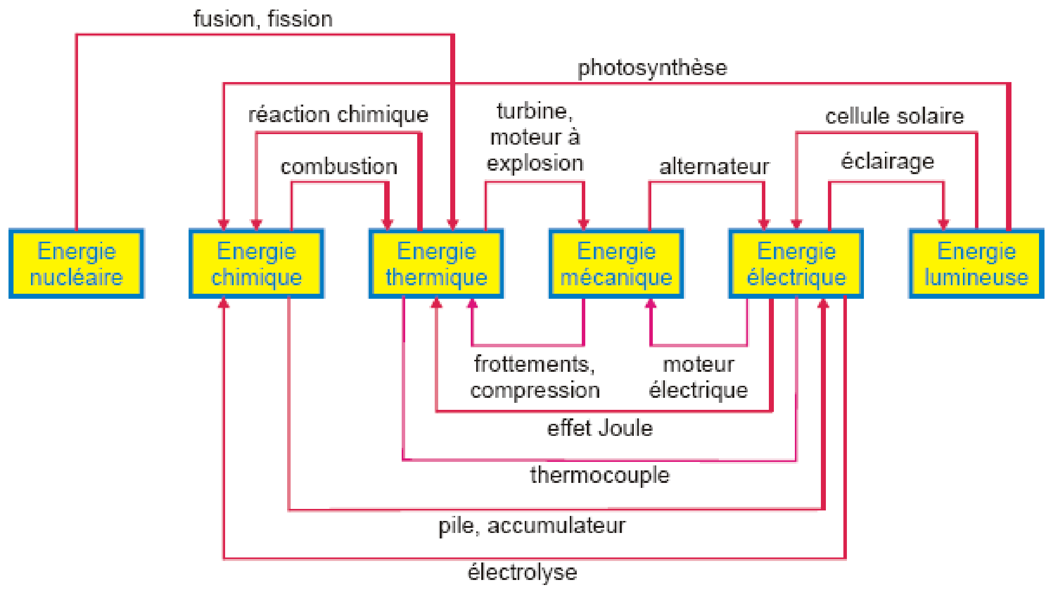


Figure 3:*Formes d'énergie et processus de conversion*

1.2.2 Unités de mesures

-L'unité de base de mesure de l'énergie est le Joule (J).

Il existe aussi d'autres unités utilisées pour mesurer la quantité de chaleur dégagée telles que: la Calorie(Cal), la Thermie (Th), la Britch Thermal Unit (BTU) .

Il y a également:

-Le Wattheure (Wh) qui est l'unité de mesure de l'énergie électrique.

-La tonne équivalent pétrole (tep) qui est plus adaptée pour éffectuer des comparaisons entre différentes formes d'énergie.

-1 cal : quantité de chaleur nécessaire pour augmenter de 1° la température de 1 g d'eau à la pression atmosphérique.

1 cal = 4,185 J

1 Th = 1000 Kcal = 1000 000 Cal

1 BTU = 1055 J

Le Watt (W) est l'unité de base de mesure de la puissance.

Une puissance de 1 Watt mise en jeu pendant 1 seconde développe une énergie de 1 Joule 1Watt x 1s = 1 J

En 1 heure : 1 Watt développe 1 Wattheurs(Wh)

1 Kilowatt (Kw) développe 1 Kilowattheure (KWh)=1000 Wh

1 tonne équivalent pétrole (tep) est l'énergie contenue dans 1 tonne de pétrole

1 tep = 1000 M^3 de gaz naturel = 10 000 Th

1 tep = 7,5 barils

1 barils (bbl) = 159 litres

1 M3 de gaz naturel = 10 Thermies = 10 000 Kcal

1.3 Magnétostatique

• Une charge électrique immobile crée un champ électrique seulement;

• Une charge en mouvement (un courant) crée un champ électrique et un champ magnétique.

1.3.1 Définition : la magnétostatique est l'étude des phénomènes magnétiques statiques, génères par des courants constants uniquement (courant continu).

1.3.2 Champs magnétique crée par un courant

Loi de Biot et Savart.

Un fil conducteur rectiligne de longueur infinie, parcouru par un courant **I** , crée, en un point **M** de l'espace situé à une distance **r** du fil, un champ magnétique dont :

- la direction est telle que les lignes de champ soient des cercles axés sur le fil.

- le sens est donné par la règle du ″bonhomme d'Ampère″: celui-ci, lorsqu'il est parcouru par I, des pieds vers la tête, voit en M le champ à sa gauche.

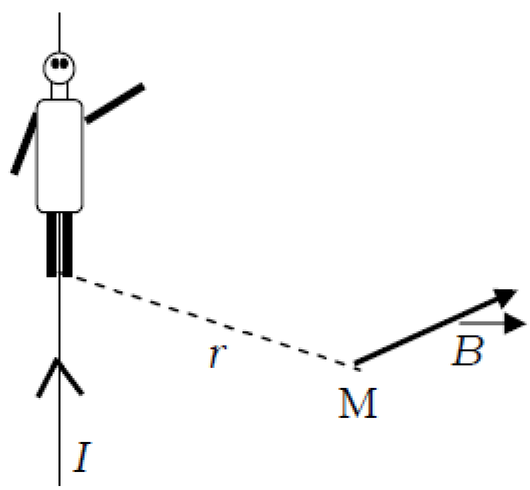
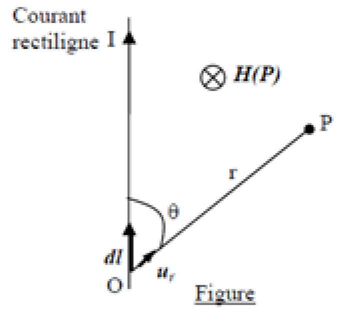


Figure 4 : *Champs magnétique créé par un courant électrique*

Loi d'Ampère

Le physicien danois Hans C. Oersted (1777 – 1851), en remarquant la déviation d'une boussole placée prés d'un conducteur traversé par un courant, fut le premier à observer le magnétisme crée par un courant électrique.



Figure

Conducteur rectiligne

$$\boxed{\boldsymbol{H} = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{I\boldsymbol{dl} \wedge \boldsymbol{u_r}}{4\pi r^2}} \;;$$

H : champ magnétique

r = OP ; $\boldsymbol{u_r}$: vecteur unitaire de r

$$\boxed{\boldsymbol{B} = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\mu_0 I\, \boldsymbol{dl} \wedge \boldsymbol{u_r}}{4\pi\, r^2}}$$

B : Induction magnétique

Remarque : La loi d'Ampère est valable si l'on suppose que le conducteur est infiniment long, donc les bornes de l'intégrale sont de -∞ à +∞.

Conducteur fermé :

$$\boxed{\boldsymbol{B} = \oint \frac{\mu_0 I\, \boldsymbol{dl} \wedge \boldsymbol{u_r}}{4\pi\, r^2}}$$

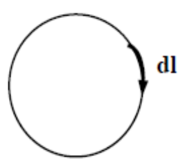


Figure : Courant circulaire

Avec

μ_0 perméabilité magnétique (vide, air…) : $\mu_0 = 4\,\pi.10^{-7} \quad H/m$

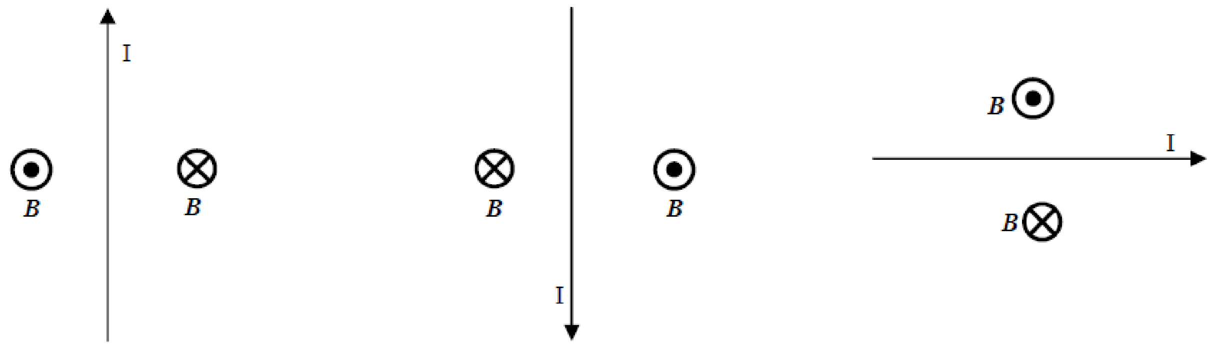
$B = \mu_0 H$

Unités

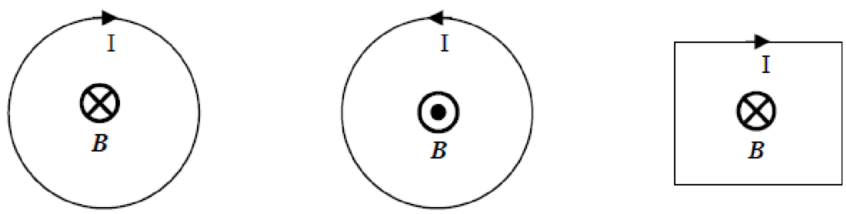
$[B] = Tesla \quad T \qquad ; \qquad [H] = \frac{A}{m}$

DIRECTION DU CHAMP MAGNETIQUE (Règle de la main droite)

a) Fil rectiligne : (Règle de la main droite)



b) Spire : (Règle du tournevis)

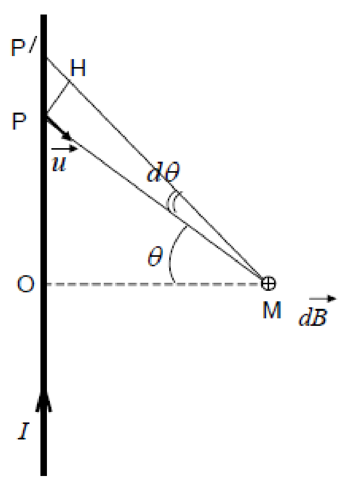


Exemple de calcule 1:

Calculer le champ magnétique H produit par un courant rectiligne infiniment long.

Solution Le champ magnétique $d\vec{B}$, créé au point M, par un élément PP' = dl du fil considéré, est donné par l'expression

$$d\vec{B} = \frac{\mu_o}{4\,\pi}\,\frac{I\,d\vec{l} \wedge \vec{u}}{r^2}$$



où r = PM

Ce champ est perpendiculaire en M au plan formé par $\vec{dl}$ et $\vec{u}$. Son sens est donné par la règle du bonhomme d'Ampère (voir la figure ci-contre). Son intensité est:

$$dB = \frac{\mu_o}{4\pi}\,\frac{I\,dl\cos\theta}{r^2}$$

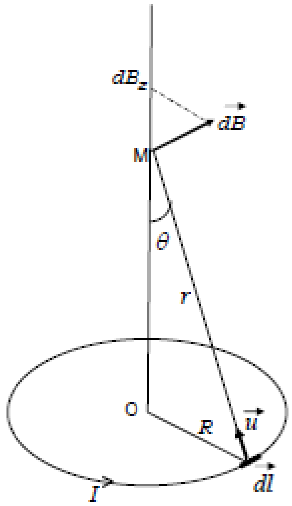
d'après la figure : $r = \dfrac{a}{\cos\theta}$ et $PH = r\,d\theta$

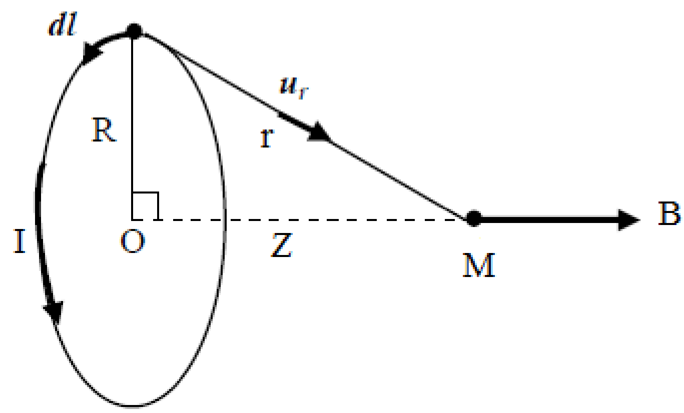
$$\Rightarrow \quad dl = \frac{r\,d\theta}{\cos\theta} \qquad \text{d'où}$$

$$dB = \frac{\mu_o}{4\pi}\,\frac{I}{a}\cos\theta\,d\theta \quad \text{et} \quad B = \frac{\mu_o I}{4\,\pi\,a}\int_{-\pi/2}^{+\pi/2}\cos\theta\,d\theta \quad \Rightarrow \quad B = \frac{\mu_o I}{2\,\pi\,a} = 2\ \mu\text{T}$$

Exemple de calcule 2:

Calculer le champ magnétique H créé par une spire circulaire en un point de son axe.





Un élément dl d'une spire, parcourue par un courant I, produit en un point M de l'axe de la spire, un champ magnétique $d\vec{B}$. Il est perpendiculaire à $d\vec{l}$ et $\vec{u}$, son sens est donné par la règle du bonhomme d'Ampère et son module est

$$dB = \frac{\mu_o}{4\pi}\frac{I\,dl}{r^2}$$

En raison de la symétrie du problème, toutes les composantes perpendiculaires à l'axe s'éliminent, et les composantes suivant oz

$$dB_z = \frac{\mu_o}{4\pi}\frac{I\,dl}{r^2}\sin\theta$$

s'ajoutent. Le champ résultant est porté par l'axe de la spire et a pour valeur :

$$B = \frac{\mu_o}{4\pi}\frac{\sin\theta}{r^2} I \int_0^{2\pi R} dl \quad \text{soit} \quad B = \frac{\mu_o}{2}\frac{\sin\theta}{r^2}\, I\,R$$

R étant le rayon de la spire et sachant que $\sin\theta = \frac{R}{r}$ on a :

$$B = \frac{\mu_o}{2}\frac{R^2}{r^3}\, I \qquad \text{soit} \quad B = \frac{\mu_o}{2}\frac{R^2}{\left(R^2+z^2\right)^{3/2}}\, I$$

Au centre de la spire, le champ a pour valeur :

$$B = \frac{\mu_o}{2R}\, I$$

Force de Lorentz

ACTION D'UN CHAMP MAGNETIQUE SUR LE MOUVEMENT D'UNE CHARGE ELECTRIQUE.

Force de Lorentz.

A la fin du XIXe siècle, le physicien hollandais Hendrik Lorentz donne l'expression de la force $\vec{F}$ qui s'exerce sur une charge ponctuelle q, se déplaçant à la vitesse $\vec{V}$ dans des champs électrique et magnétique $\vec{E}$ et $\vec{B}$:

$$\vec{F} = q\left(\vec{E} + \vec{V} \wedge \vec{B}\right)$$

En présence du seul champ magnétique $\vec{B}$ ($\vec{E}$ = 0), la force de Lorentz devient :

$$\vec{F} = q\,(\vec{V} \wedge \vec{B})$$

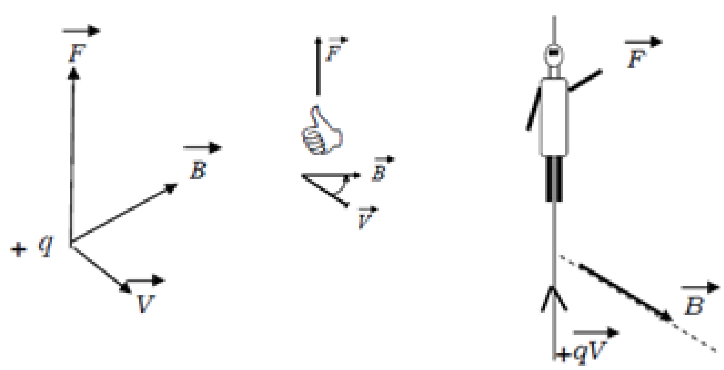
Un champ magnétique est une région de l'espace où, en l'absence du champ électrique $\vec{E}$, une charge q animée d'une vitesse $\vec{V}$, est soumise à l'action d'une force $\vec{F} = q\,(\vec{V} \wedge \vec{B})$.

Cette nouvelle définition du champ magnétique est obtenue à partir de la force de Lorentz. Cette force

- a pour module:

$$F = q\,V\,B\left|\sin\left(\vec{V},\vec{B}\right)\right|$$

- sa direction est la perpendiculaire au plan formé par $\vec{V}$ et $\vec{B}$,
- Son sens est tel que, dans le cas d'une charge positive, les vecteurs $\vec{V}$, $\vec{B}$ et $\vec{F}$ forment un trièdre direct (règle de la main droite). Lorsque la charge est négative la force change de sens.



Le sens de cette force est également donné par la **règle du bonhomme d'Ampère** :

Le bonhomme d'Ampère, traversé des pieds vers la tête par la charge (+q) animée d'une vitesse V, voit fuir les lignes de champ, et a la force à sa gauche

ACTION D'UN CHAMP MAGNETIQUE SUR UN COURANT ELECTRIQUE.

Force de Laplace.

Lorsqu' un fil conducteur, parcouru par un courant I, est placé dans un champ magnétique $\vec{B}$, chaque élément $d\vec{l}$ du fil subit une force :

$$\overrightarrow{dF} = I\, d\vec{l} \wedge \vec{B}$$

Cette force est perpendiculaire au plan formé par le champ $\vec{B}$ et l'élément de courant considéré. Son sens est donné par la règle du bonhomme d'Ampère .

Le bonhomme d'Ampère, parcouru par le courant I, des pieds vers la tête, a la force à sa gauche lorsqu'il regarde les lignes de champ.

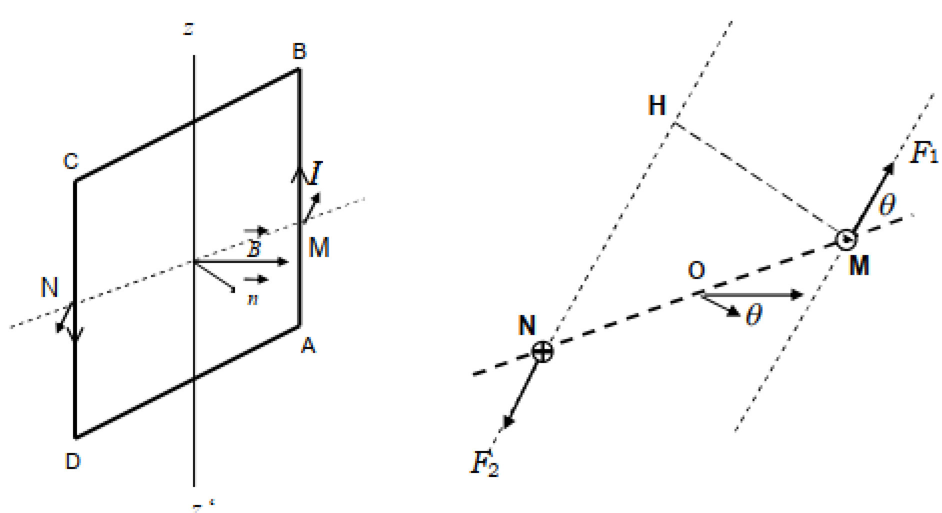
Nous allons démontrer la loi de Laplace à partir de la force de Lorentz trouvée soixante dix ans après.

Action d'un champ sur un circuit fermé. Moment magnétique.

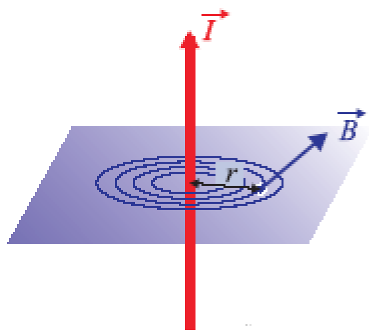
On considère, pour simplifier, un circuit rectangulaire, de longueur AB = l et de largeur BC = a , parcouru par un courant I . Ce circuit C, mobile autour d'un axe fixe *zz'*, est placé dans un champ magnétique uniforme $\vec{B}$, la normale à la spire C fait un angle θ avec $\vec{B}$.
Le côté AB est soumis, en M, à l'action d'une force de module :

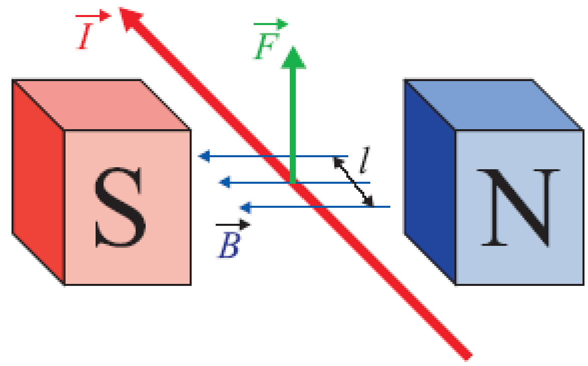
$$F_1 = F = B\, I\, l$$

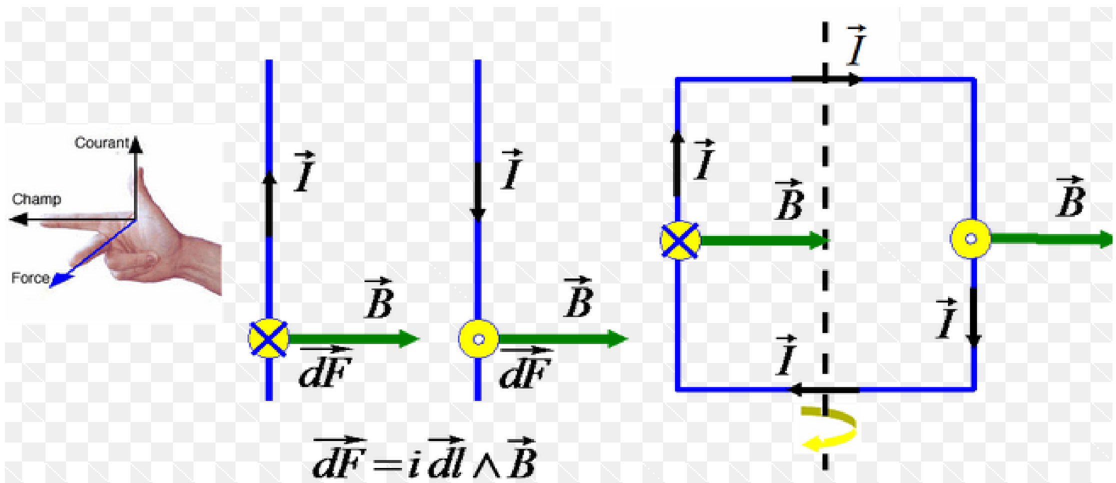
dont la direction est le sens sont donnés par la règle du bonhomme d'Ampère



Cas particuler : La surface est perpenduculaire à l'induction magnétique







De même CD est soumis, en N, à une force $\vec{F}_2$ égale et opposée à $\vec{F}_1$. La résultante des forces qui agissent sur BC est nulle, il en est de même de AD.

Ainsi le circuit est soumis à un couple formé de $\vec{F}_1$ & $\vec{F}_2$ et dont le module est égal à :

$$\Gamma = F\,\mathrm{MH}$$

Or

$$\mathrm{MH} = \mathrm{MN}\sin\theta = a\sin\theta$$

D'où: $\Gamma = I\,l\,a\,B\sin\theta$ 0n pose : $\vec{M} = I\,S\,\vec{n}$ avec $S = al$

C'est le moment magnétique du circuit rectangulaire considéré.

Le couple, qui agit sur ce circuit, s'écrit

$$\vec{\Gamma} = \vec{M} \wedge \vec{B}$$

Ce résultat est général.

Un circuit, comportant N spires de surface S, parcouru par un courant I, possède un moment magnétique :

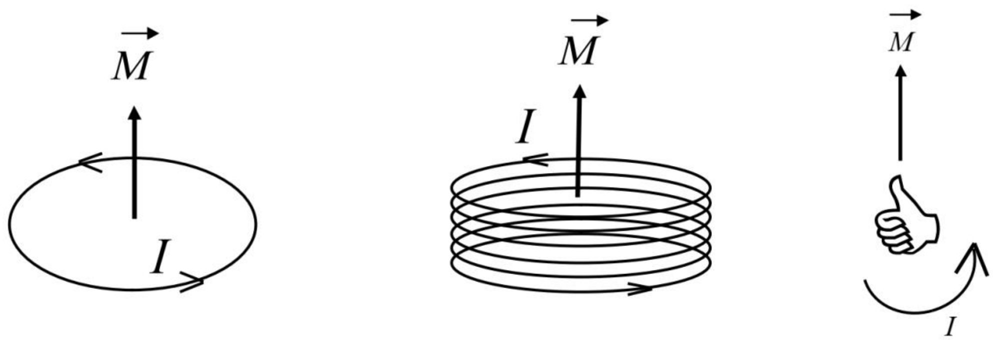
$$\vec{M} = N\,I\,S\,\vec{n}$$

où $\vec{n}$ est un vecteur unitaire porté par la normale aux spires.

Le moment magnétique est mesuré en ampère mètre carré ($A.m^2$)

Placé dans un champ magnétique $\vec{B}$, le circuit est soumis à un couple

$$\vec{\Gamma} = \vec{M} \wedge \vec{B}$$



Energie d'un circuit placé dans un champ magnétique.

l'énergie potentielle d'un circuit parcouru par un courant *I*, de moment magnétique :

$$\vec{M} = I\,S\,\vec{n}$$

placé dans un champ magnétique $\vec{B}$ est :

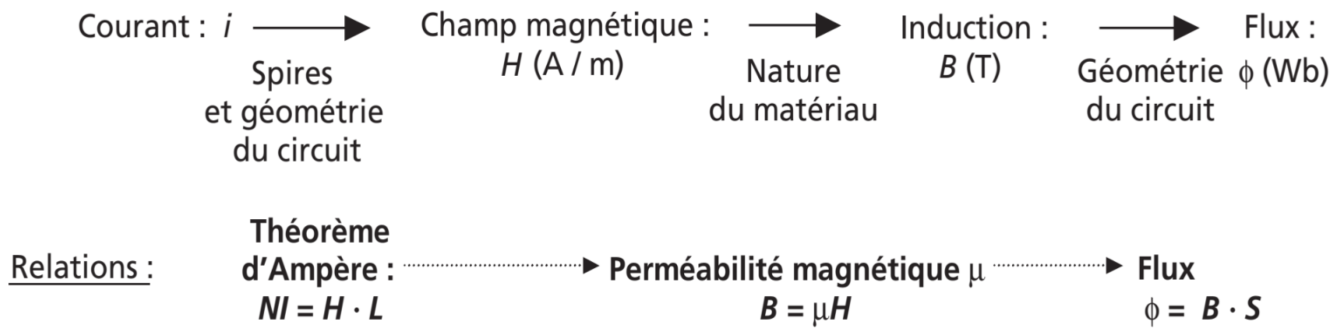
$$\mathcal{E}_p = -\vec{M}.\vec{B}$$

De même l'énergie d'un aimant de moment $\vec{M}$ est :

$$\mathcal{E}_p = -\vec{M}.\vec{B}$$

1.3.2 Circuits magnétiques :

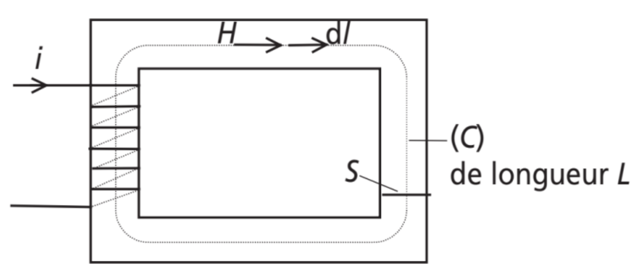
Les inductances, transformateurs, alternateurs, machines asynchrones, etc., sont basés sur l'utilisation de *circuits magnétiques*, c'est-à-dire de masses de matériaux dits « magnétiques » propres à canaliser une *induction magnétique*. Plus que de l'induction, on parle souvent du « flux » de cette induction. La *figure 2.1* présente un résumé des grandeurs mises en jeu dans les circuits magnétiques linéaires ainsi que des relations simplifiées qui les relient.



Grandeurs du magnétisme en électrotechnique.

➤Circuits magnétiques homogènes et linéaires

Les circuits magnétiques sont essentiellement réalisés avec des matériaux ferromagnétiques ou ferri-magnétiques car ils permettent d'obtenir des inductions élevées. En effet, dans l'air ou un matériau quelconque, les lignes de champ produites par un bobinage parcouru par un courant ne sont pas canalisées et le flux produit ne prend que des valeurs très faibles. En revanche, dans le fer, les lignes de champs sont « concentrées » dans la matière ce qui produit de grandes valeurs du flux.



Morphologie classique d'un circuit magnétique bobiné

Dans ce circuit magnétique la canalisation des lignes de champ étant importante, on fait l'hypothèse que le champ magnétique est constant, notamment sur une courbe moyenne (*représentée en pointillés*). Or, le théorème d'Ampère s'écrit sur ce contour :

$$\int_C \overrightarrow{H} \cdot \overrightarrow{\mathrm{d}l} = \int_C H \cdot \mathrm{d}l = NI$$

Soit donc :

$$H \,.\, L = N\,I$$

On écrit alors, pour les circuits linéaires, c'est-à-dire : $B = \mu H = \dfrac{\mu NI}{L}$

c'est-à-dire : $\Phi = BS = \dfrac{\mu SNI}{L}$

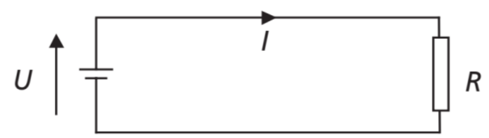
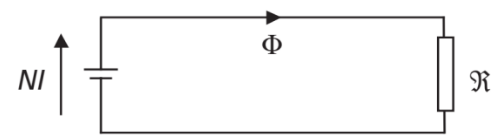
Pour retenir une relation pratique entre le flux et le courant qui le crée, on fait intervenir la grandeur appelée *Réluctance* et notée R satisfaisant à la relation dite *d'Hopkinson* : $NI = R\Phi$

En résumé, pour caractériser toutes les grandeurs dans un circuit magnétique homogène linéaire, on retiendra la relation :

$$\boxed{NI = \Re\Phi \text{ avec } \Re = \frac{L}{\mu S}}$$

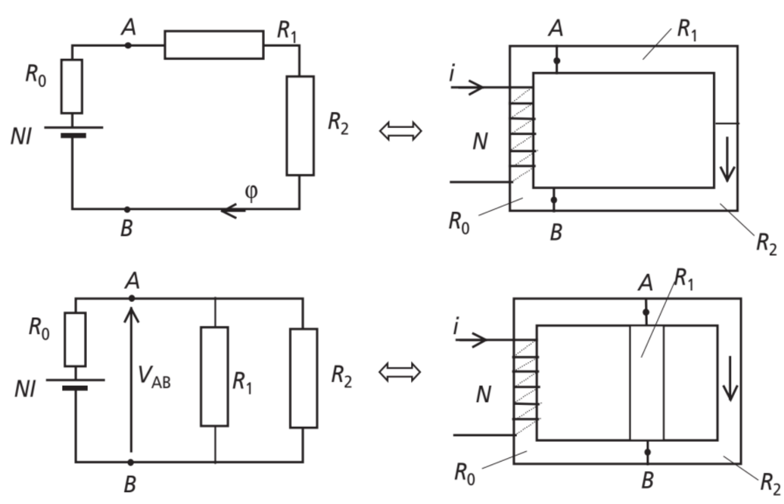
➢Analogie avec les circuits électriques

L'utilisation de la notion de réluctance permet de dresser une analogie entre les relations des circuits magnétiques et les relations des circuits électriques.

Circuits électriques	**Circuits magnétiques**
	
U : Force électromotrice fem	NI : Force magnétomotrice fmm
R : Résistance	$\Re$: Réluctance
Loi d'Ohm : $U = R \cdot I$	Loi d'Hopkinson : $N \cdot I = \Re \cdot \Phi$
Associations de Résistances Série : $R = R_1 + R_2$ Parallèle : $R = R_1 \cdot R_2/(R_1 + R_2)$	Associations de Réluctances Série : $\Re = \Re_1 + \Re_2$ Parallèle : $\Re = \dfrac{\Re_1 \cdot \Re_2}{\Re_1 + \Re_2}$

➢Circuits hétérogènes linéaires

Un circuit est dit hétérogène dès lors qu'il est constitué de matériaux différents ou de géométries à sections variables.



Circuits magnétiques hétérogènes série et parallèles.

➢Inductance

L'inductance est, en régime linéaire, la grandeur de proportionnalité entre le courant dans le bobinage et le flux dit « total » intercepté par le bobinage, c'est-à-dire le flux : $\Phi_T = N \cdot \phi$

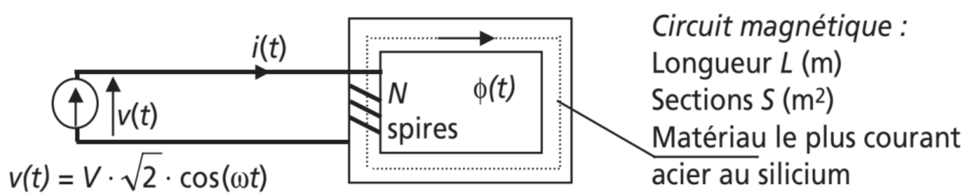
On écrit alors : $\Phi_T = N \cdot \dfrac{NI}{\Re} = L \cdot I$

La grandeur L est l'inductance du circuit magnétique bobiné, son unité est le *Henry* (H). On retiendra : $\boxed{L = \dfrac{N^2}{\Re}}$

Circuits magnétiques en régime alternatif sinusoïdal

<u>Loi de Lenz</u>

En régime alternatif sinusoïdal, la relation entre la tension aux bornes du bobinage enroulé sur un circuit magnétique et le flux qui le parcours est la loi de Lenz. Il apparaît alors une relation directe entre l'induction maximale (la valeur maximale de l'induction sinusoïdale) et la valeur efficace de la tension aux bornes du bobinage.



Loi de Lenz : La loi de *Lenz* s'écrit, en convention générateur,

$$v(t) = N \cdot \frac{d\Phi}{dt} = \frac{d\Phi_T}{dt}$$

Relation Tension / Induction :

$$v(t) = N \cdot \frac{d\Phi}{dt} = V \cdot \sqrt{2} \cdot \cos(\omega t) \quad \Rightarrow \Phi(t) = \frac{V \cdot \sqrt{2}}{N \cdot \omega} \cdot \sin(\omega t) = B(t) \cdot S$$

ainsi : $B_{\max} = \dfrac{V \cdot \sqrt{2}}{S \cdot N \cdot \omega} = \dfrac{V \cdot \sqrt{2}}{S \cdot N \cdot 2\pi f}$ ou $V = \dfrac{2\pi}{\sqrt{2}} N \cdot B_{\max} \cdot S \cdot f$

On retiendra la relation : $\boxed{V = 4,44 \cdot N \cdot B_{\max} \cdot S \cdot f}$

Energie magnétique emagasinée dans une bobine

On considère l'exemple d'une bobine torique comprenant n spires.
Déterminer l'énergie emmagasinée quand le courant dans la bobine croit de 0 à I.
Considérons un circuit formé par une inductance.
A l'instant *t* nous avons : $U=L\frac{dI}{dt}$
En multipliant les deux membres par i dt de façon à faire apparaître les énergies mises en jeu pendant dt :
$Uidt=Lidi=d\left(\frac{1}{2}Li^2\right)$
Le terme *U i dt* représente l'énergie fournie par le générateur, le terme $dW=d\left(\frac{1}{2}Li^2\right)$ correspond à l'énergie fournie pour établir le courant i, énergie emmagasinée dans l'inductance.

démontrer que la densité de l'énergie magnétique est :

$$w_m=\frac{1}{2}\mu_0 H^2$$

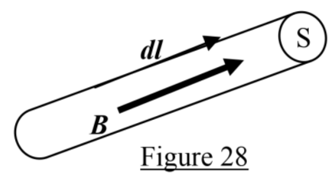


Figure 28

Considérons pour cela un tube élémentaire d'induction

Posons
$dV = S\,dl$
L'énergie magnétique localisée dans l'élément de volume dV est :
$dW=\frac{1}{2}\pi_0 H^2\,dV=\frac{1}{2}\pi_0 H^2 Sdl$
En tenant compte que le flux d'induction est constant dans le tube : $\Phi=\int \boldsymbol{B}.\boldsymbol{dS}=B.S$
et du théorème d'Ampère : $\oint \boldsymbol{H}.\boldsymbol{dl}=I$,
on obtient :
$W=\frac{1}{2\pi_0}B^2 Sdl=\frac{1}{2\pi_0}BS\int Bdl=\frac{1}{2}BS\int Hdl=\frac{1}{2}\Phi I$
Comme
$\Phi = L\,I$
$W=\frac{1}{2}\Phi I=\frac{1}{2}LI^2$
<u>Conclusion</u> : le champ magnétique emmagasine bien une énergie de densité $w_m = ½\, \mu_0\, H^2$.