ROYAUME DU MAROC FORCES
ARMEES ROYALESPLACE DE
KENITRA
CENTRE D’INSTRUCTION DES TRANSMISSIONS

الله

الوطن الملك

ELECTRICITE / PHYSIQUE

2eme année

2023/2024

Professeur : H.HASSIBOUN

SOMMAIRE ELECTRICITE

Généralités sur le courant alternatif

I - définition du courant alternatif

En première année nous n'avons considère que des courants d'intensité constante , mais les courants peuvent dépendre du temps, la loi de Lenz en fournit l'exemple.

$$\mathbf{e = -\frac{d\emptyset}{dt} = -L \cdot \frac{di}{dt}}$$

Nous allons étudier des courants variables dont l'intensité est fonction du temps

1.1. - phénomène périodique : théorème de Fourier

Une fonction périodique est telle que:

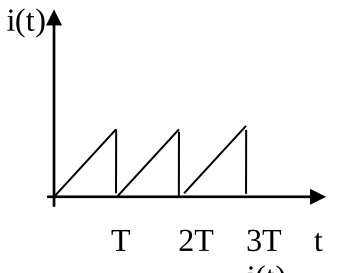
$$f(t) = f(t + n.T)$$

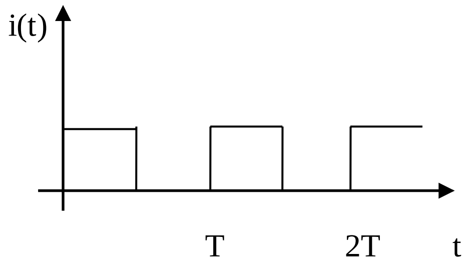
t : variable (temps)
T : période du mouvement
n : un entier

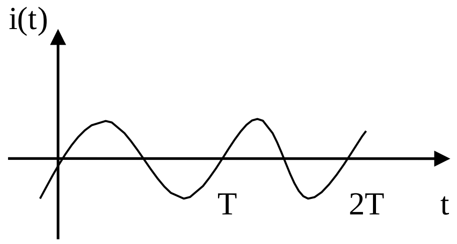
Les fonctions sinusoïdales présentent une importance exceptionnelle en vertu du théorème de Fourier :

Une fonction périodique quelconque de fréquence N peut toujours être décomposée enfonctions sinusoïdales de fréquence N;2N;3N , dont la somme .

la fonction de fréquence N est appelée **fonction fondamentale**, les autres sont des fonctions **harmoniques**.



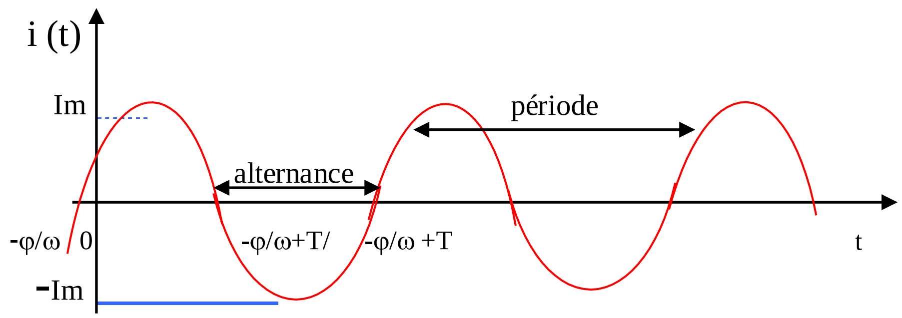




1.2.- le courant alternatif

Un circuit électrique fermé dont le générateur est un alternateur produisant une f.e.m. alternative sinusoïdale, est parcourue par un courant sinusoïdal alternatif de même fréquence. L'intensité i est de la forme :

$$\mathbf{i(t) = Im \cdot \sin(\omega t + \varphi)}$$



- i(t) : valeur instantanée de l'intensité à l'instant t.
- Im : intensité maximale
- ω : pulsation (rad/s)
- φ : phase à l'origine

La fréquence est donnée par : $\mathbf{N} = \frac{\omega}{2\pi}$

La période est donnée par : $\mathbf{T} = \frac{1}{N} = \frac{2\pi}{\omega}$

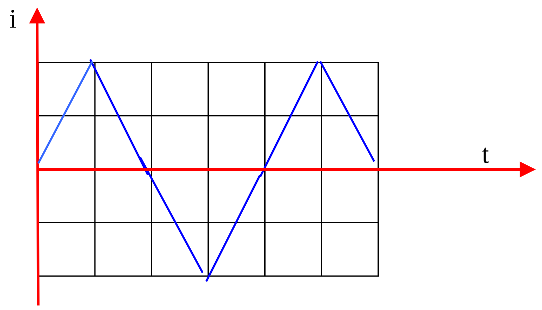
Remarques :

I_m : s'appelle intensité maximale ou amplitude elle s'exprime en Ampères (A)
Sin (ωt + φ) varie entre -1 et +1 donc l'intensité i varie entre $-I_m$ et $+I_m$.

T : période est la durée au bout de laquelle le courant se reproduit identique à lui-même. Elle s'exprime en seconde (s).
N: (appelée aussi f) fréquence, nombre de répétitions par seconde ; la fréquence du Maroc est 50Hz.

1.3/ Exemples :
a/ L'expression de l'intensité d'un courant en fonction du temps est : i(t) = 2sin(100π t)
1/ quelle est la nature de ce courant ?
2/ déterminer l'intensité maximale, l'intensité efficace, et la pulsation du courant ?

b/ soit la courbe i(t) = f(t) suivante



Echelle :
Temps 10ms /div
intensité 0,4A /div

1/ déterminer l'intensité maximale et l'intensité efficace de ce courant ?
2/ déterminer la période, la fréquence et la pulsation de ce courant ?

1.4/ tension sinusoïdale :

Tout ce que nous avons dit pour les intensités peut se répéter pour les f.e.m. et pour les tensions u(t) sinusoïdales.

$$u(t) = U_m \sin(\omega t + \varphi)$$

Exemple :

L'expression d'une tension en fonction du temps est : $u(t) = 220.\sqrt{2}\sin(100\pi t)$

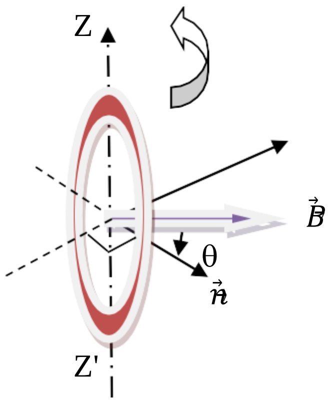
1/ quelle est la nature de cette tension ?

2 / déterminer la valeur maximale et efficace de cette tension ?

3 / déterminer la pulsation, la fréquence et la période de cette tension ?

II - production de courant alternatif

Considérant une bobine plate comportant N spires, chacune des faces de surface S, tournant d'un mouvement uniforme de vitesse angulaire ω autour de l'axe ZZ', dans une induction magnétique $\vec{B}$ normale à ZZ'.



$$\theta = \omega.t$$

Le flux d'induction à travers le circuit est:

$$\Phi = N.\varphi = N.B.S.\cos(\theta) = N.B.S.\cos(\omega.t)$$

φ : flux à travers une spire de la bobine.

Ce flux variable produit une f.e.m. d'induction **e** :

$$e = -\frac{d\Phi}{dt} = N.B.S.\omega.\sin(\omega t)$$

De la forme : $e = E_m.\omega.\sin(\omega t)$

avec : $E_m = N.B.S.\omega$

La f.e.m. induite est sinusoïdale de période $T = \frac{2\pi}{\omega}$; l' intensité du courant débité au même instant dans un circuit associé à la bobine est de la forme :

$$i(t) = Im.\sin(\omega t + \alpha)$$

α : représente le déphasage de i (t) par rapport à la tension e.

III. effets du courant alternatif:

3.1 - effets chimiques

D'après **la loi de Faraday** la masse m du métal d'posé (ou de l'hydrogène dégagé) à la cathode d'un électrolyseur est proportionnelle à la quantité d'électricité Q qui traverse l'électrolyseur :

$$m \approx \frac{1}{96500} \cdot \frac{A}{n} \cdot Q$$

m: masse en gramme
Q : charge en Coulomb
A: masse molaire atome - gramme
n: valence de la substance

En courant alternatif, dans l'électrolyse d'une solution aqueuse, les deux électrodes sont alternativement anode et cathode et que les quantités d'électricité transportées en sens inverse pendant les alternances successives sont égales, **l'effet moyen est nul**.

le courant alternatif ne peut être utilisé dans les opérations de l'électrochimie.

3.2- effets électromagnétiques

Les lois générales qui ont été énoncées en courant continu sont encore vraies à chaque instant mais l'effet moyen peut être différent.

Une portion de circuit parcourue par un courant et placée dans un champ magnétique est soumise à une force électromagnétique dont les caractéristiques sont données par **la loi de Laplace :**

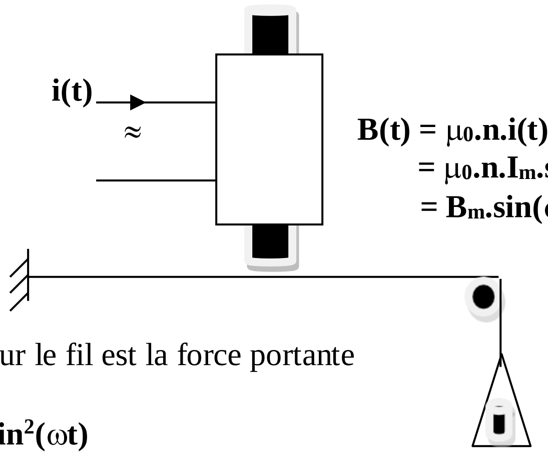
$$F = B.I.L.\sin\alpha$$

Comme l'intensité de cette force est proportionnelle à chaque instant à celle du courant alternatif :

la force électromagnétique est également alternative de même fréquence que celle du courant et en phase avec lui.

Si $\quad i(t) = Im.\sin(\omega t)$

Donc $\quad F(t) = Im.B.L.\sin(\omega t) \quad$ si $\alpha = \pi/2$



$B(t) = \mu_0.n.i(t) \qquad (\mu_0 = 4\pi 10^{-7})$
$= \mu_0.n.I_m.\sin(\omega t) \qquad (n = N/L)$
$= B_m.\sin(\omega t)$

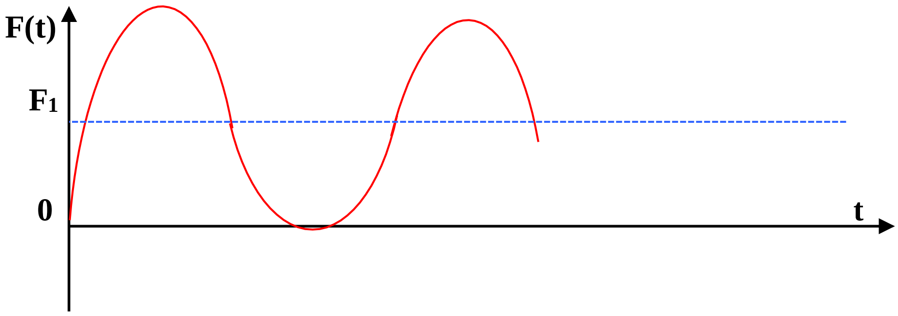
La force d'attraction qui s'exerce sur le fil est la force portante del'électro-aimant :

$$F = \frac{B^2.S}{2\mu 0} = \frac{Bm^2.S}{2\mu 0}.\sin^2(\omega t)$$

$$F = \frac{Bm^2.S}{4\mu 0}.(1- \cos(2\omega t))$$

En décomposant en deux forces :

- Une force constante, valeur moyenne de f(t) :**F_1** = $\frac{Bm^2.S}{4\mu 0}$
- Une force sinusoïdale qui change périodiquement de sens avec une fréquence double de celle du courant **N' = 2.N :** **F_2 = - $\frac{Bm^2.S}{4\mu 0}$ cos(2ωt)**



3.3. Effets calorifiques :

a/ effet Joule

Un calorimètre, dans lequel on plonge une résistance électrique parcourue par un courant alternatif ; s'échauffe.

Le courant alternatif a des effets calorifiques analogue à ceux du courant continu

b/ Intensité efficace :

L'intensité efficace d'un courant périodique quelconque est l'intensité d'un courant constant qui, dans le même circuit et pendant le même temps, produirait le même dégagement de chaleur.

Dans le cas d'un courant sinusoïdal, l'intensité efficace s'exprime par :

$$\mathbf{I = \frac{Im}{\sqrt{2}}}$$

Démonstration :

Une résistance R parcourue par un courant : i(t) = Im.sin(ωt)

l'énergie dissipée par effet joule pendant la durée Δt est:

$$\Delta W = R.i^2.\Delta t = R.(I_m^2.\sin^2(\omega t)).\Delta t$$

Donc $$\Delta W/\ \Delta t = R.(Im^2.\sin^2(\omega t)) = ½\ R.\ Im^2.(1- \cos(2\omega t)).$$

Si Δt tend vers 0 : $$dW = ½\ R.Im^2\ (1 – \cos(2\omega t).dt$$

Calculons l'énergie dissipée pendant une période T:

$$W = \int_0^T ½\ R.Im2\ (1\ - \cos(2\omega t)).dt$$

$$W = ½\ R.Im^2\ [1 - \sin(2\omega t)\ /2\omega]_0^T$$

Mais en courant continu on a pour la même durée T:

$$W = R.I^2.T$$

D'où :

I^2 = ½.Im^2 soit **I = 1/$\sqrt{2}$.Im**

Remarque :

En plaçant de la même façon un voltmètre thermique en dérivation aux bornes d'une résistance parcourue par un courant alternatif**,** l'appareil indiquera une d.d.p. efficace on a donc :

$$\mathbf{V = R.I}$$

Donc si V_m est la valeur maximale de la d.d.p. $v(t) = V_m \sin(\omega t)$:

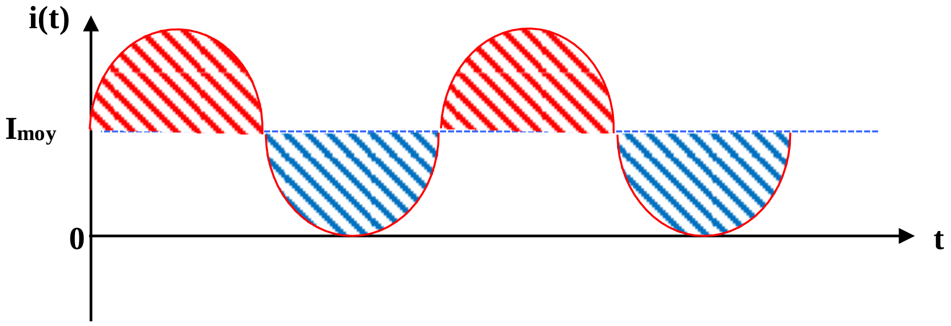
$$\mathbf{V = \frac{1}{\sqrt{2}}.V_m}$$

Ces formules ne sont valables que si le courant est sinusoïdal.
L'intensité efficace est donnée par un ampèremètre thermique.

La valeur moyenne est le niveau continu tel que la surface située au-dessus de ce niveau etcelle située au-dessous soient égales pour une période.

$$\mathbf{I_{moy}} = \int_0^T \boldsymbol{i.dt}$$

Pour un courant alternatif: $\mathbf{I_{moy} = 0}$



4. exercices

exercice 1:

a/ Déterminer la quantité d'électricité débitée pendant une alternance, le courant étant sinusoïdal.
b/ Quelle est l'intensité du courant continu qui débiterait la même quantité d'électricité pendant le même temps

exercice 2:

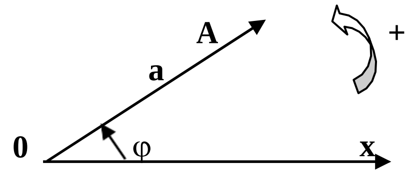
a/ calculer l'intensité efficace du courant périodique:
$i(t) = I_0 + I_1.\cos\omega t$
b/ calculer l'intensité maximale Im et l'intensité efficace I du courant:
$i(t) = I_1.\cos\omega t + I_2.\sin\omega t$

Eléments purs R-L-C en sinusoïdal
notion d'impédance

I. Construction de Fresnel

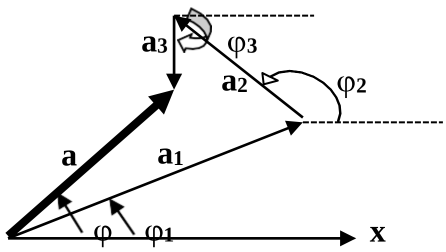
1.1 Vecteur de Fresnel

Par convention on représente la fonction $y(t) = a.\sin(\omega t + \varphi)$ par un vecteur $\vec{OA}$ dans la position qu'il occupe à l'instant initial t = 0; le module du vecteur représente l'amplitude a de la fonction sinusoïdal et l'angle $(\vec{OX}, \vec{OA})$ représente sa phase initiale.



Généralisation

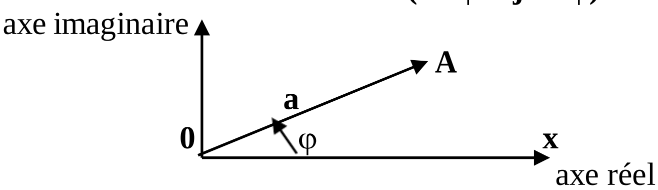
Le vecteur représentatif de la somme algébrique d'un nombre quelconque de fonctions sinusoïdales de même période est la somme géométrique des vecteurs qui représentent ces fonctions.



1.2 Notion complexe

La fonction sinusoïdale $y(t) = a.\sin(\omega t + \varphi)$ a été représentée par un vecteur $\vec{OA}$, le vecteur de Fresnel. Il est possible d'associer à ce vecteur, un nombre complexe indépendant du temps noté:

$$\overline{OA} = a.(\cos\varphi + j.\sin\varphi)$$



Ainsi un nombre complexe de module a et de phase φ est l'image d'une fonction d'amplitude a et de phase l'origine φ.

I. Etude de l'influence des éléments purs:

2.1. Résistances pures

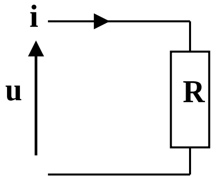
2.1.1. Définition : c'est un conducteur passif d'une résistance constante dépourvu d'inductance et de capacité sa valeur est donnée par : $R = \rho.\frac{l}{S}$

Une résistance pure est une construction de l'esprit :

- Tout conducteur parcouru par un courant crée un champ magnétique ; et possède dece fait une certaine inductance.
- Deux portions voisines d'un conducteur présentent entre elles une capacité dite parasite.

Néanmoins ; la capacité parasite et l'inductance ont des effets négligeables en BF.

2.1.2. Déphasage et intensité efficace



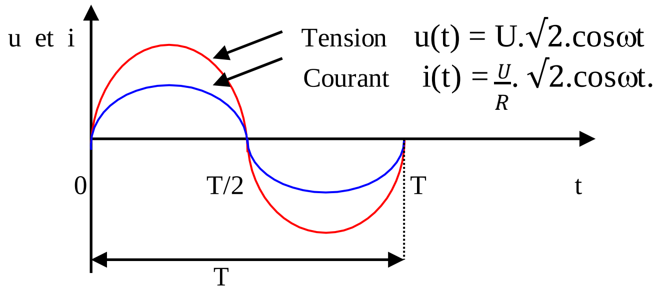
Appliquons aux bornes d'une résistance pure **R** la d.d.p. sinusoïdale $u = U.\sqrt{2}.\cos\omega t$.
nous pouvons écrire :

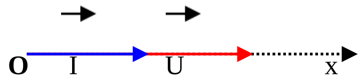
$$\mathbf{i = \frac{u}{R} = \frac{U}{R}.\sqrt{2}.\cos\omega t.}$$

Conclusion:

- le courant est sinusoïdal.
- il est en phase avec la d.d.p.
- sa valeur efficace est $\mathbf{I = \frac{U}{R}}$

Représentation cartésienne:





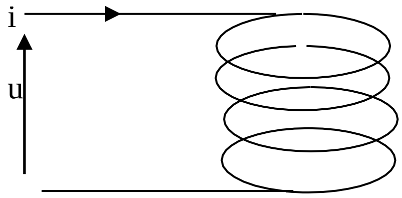
2.2. Inductances pures:

2.2.1. Définition: C'est un conducteur**:**

- doué d'une inductance constante
- dépourvu de résistance et de capacité

Une inductance est donc entièrement définie par son **coefficient d'auto-induction L**.
Une inductance pure est encore une construction de l'esprit, mais en BF, la capacité parasite est négligeable et la résistance peut être réduite autant qu'on le désire.

2.2.2. Déphasage et intensité efficace



Appliquons, aux bornes d'une inductance pure L une d.d.p. sinusoïdale $u(t) = U.\sqrt{2}.\cos\omega t$
l'inductance se comporte comme un récepteur de f.c.e.m. e(t).

$$e(t) = -L.\frac{di}{dt}$$

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

$$di = \frac{1}{L}.U.\sqrt{2}.\cos\omega t.dt$$

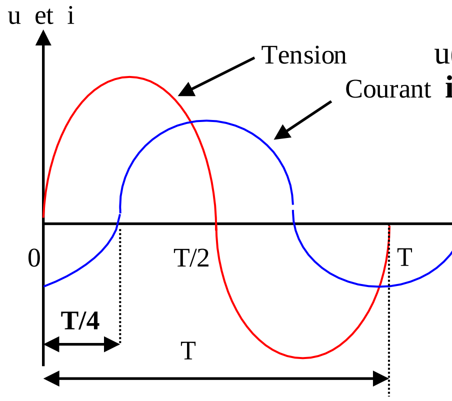
$$\mathbf{i = \frac{1}{L\omega}.U.\sqrt{2}.\cos(\omega t - \frac{\pi}{2})}$$

Conclusion:

- Le courant i est sinusoïdal
- il est déphasé de $\frac{\pi}{2}$ en arrière sur lad.d.p.
- Sa valeur efficace est $\mathbf{I = \frac{1}{L\omega}.U.}$

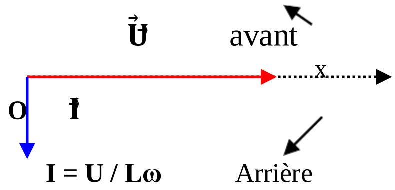
Lω**,** homogène à une résistance, est appelé réactance d'induction, s'exprime en ohms,

Représentation cartésienne



$u(t) = U.\sqrt{2}.\cos\omega t$

$\mathbf{i(t) = \frac{1}{L\omega}. U.\sqrt{2}.\cos(\omega t - \frac{\pi}{2})}$



2.3. Capacité pure:

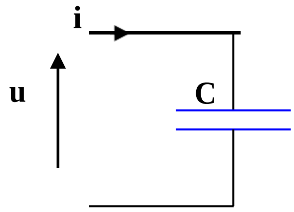
2.3.1. Définition: c'est un condensateur idéal dont le diélectrique:

- est parfait (pas d'hystérésis diélectrique)
- a une résistance infinie.

une capacité est définie par sa capacité C

une capacité pure est une construction de l'esprit: mais en B Fon néglige les imperfections: résistance des fils de connexion; le diélectrique non parfait et de résistivité non infinie

2.3.2. Déphasage et intensité efficace:



Appliquons aux bornes d'une capacité C une d.d.p. sinusoïdale $u(t) = U.\sqrt{2}.\cos\omega t$

si q désigne la charge du condensateur à l'instant t:

$$q = C.u(t) = C.\ U.\sqrt{2}.\cos\omega t$$

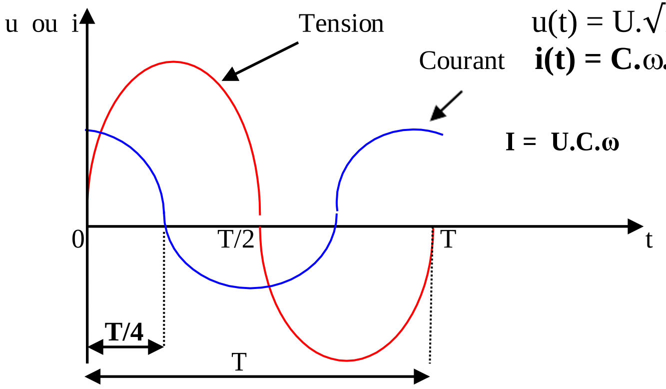
$$\mathbf{i(t) = \frac{dq}{dt} = C.\omega.\ U.\sqrt{2}.\cos(\omega t + \frac{\pi}{2})}$$

Conclusions:

- le courant est sinusoïdal
- il est déphasé de $\frac{\pi}{2}$ en avance sur la d.d.p.
- sa valeur efficace est **I = U.C.ω**

$\mathbf{\frac{1}{C.\omega}}$ homogène à une résistance, est appelé réactance de capacité est s'exprime en ohms.

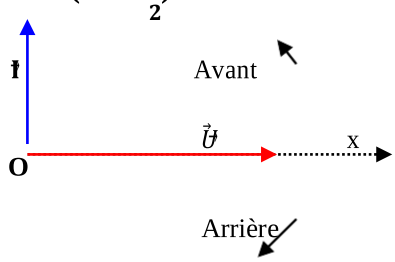
Représentation cartésienne



$u(t) = U.\sqrt{2}.\cos\omega t$

$\mathbf{i(t) = C.\omega. U.\sqrt{2}.\cos(\omega t + \frac{\pi}{2})}$

I = U.C.ω



Dans les trois cas nous avons une équation de la forme: $U = Z.I$
Z = R pour une résistance
Z = L.ω pour une inductance
Z = 1 / C.ω pour une capacité

Exercices :

1°/ Une tension continue de 24V, appliquée aux bornes d'une bobine, produit un courant de 6A.

Sous une tension alternative de 220V, de fréquence f = 50Hz, la bobine est traverséepar un courant de 4A, calculer :

- ✓ La résistance R de la bobine
- ✓ L'impédance d'induction Lω
- ✓ L'inductance L de la bobine.

2°/ un moteur à courant alternatif fonctionne sous 220V et 4A. Il absorbe 2kW. Quel est le facteur de puissance de ce moteur ?

3° / Une installation électrique monophasée alimentée sous une tension sinusoïdale de valeur efficace U=220V, 50Hz, comprend :

- ➢ Trois moteurs identiques, absorbant chacun un courant I = 16A sous un facteur de puissance de 0,70.
- ➢ Une machine à souder absorbant une puissance de 3,3 kW sous un facteur de puissance de 0,60
- ➢ Un four électrique de 3kW

Pour le fonctionnement en régime nominal (tous les récepteurs sont en service) calculer :

1. Les puissances : actives, réactives et apparente de l'installation. ?
2. Le courant total absorbé par l'installation. ?
3. Le facteur de puissance global de l'installation ?
4. Quelle est la capacité du condensateur à placer en parallèle avec l'installation pour relever le facteur de puissance à 0,9 ?

4° /Un groupe électrogène alimente sous 220V, 50Hz :

- ➢ 05 lampes de 100W chacune
- ➢ 05 tubes fluorescents de 60W, avec un facteur de puissance de 0,85.
- ➢ 03 moteurs identiques de puissance 4kW avec un facteur de puissance de 0,7, On demande :

1. La puissance du groupe ?
2. Le facteur de puissance de l'ensemble ?
3. Calculer la capacité du condensateur qui permet, à l'installation, un nouveau facteur de puissance de 0,9.

SYSTEME TRIPHASE

I. Introduction

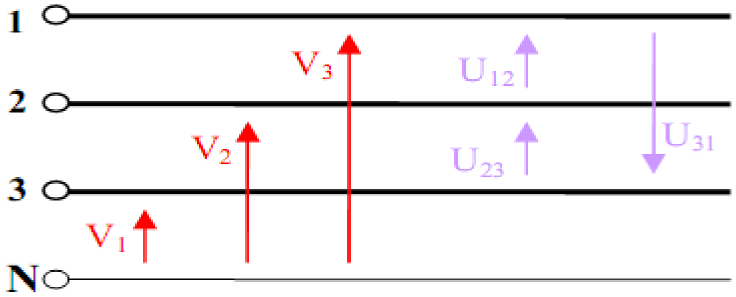
Les réseaux triphasés sont très répandus dans le monde industriel en raison de leurs nombreuses propriétés favorables à la production, au transport et à l'utilisation des grandeurs électriques.

II. Réseau triphasé équilibré

2.1. Définition

Un système triphasé est un réseau à trois grandeurs (tensions ou courants) sinusoïdales de même fréquence et déphasées, les unes par rapport aux autres, d'un angle de $2\pi/3$. Le système est équilibré si les grandeurs sinusoïdales sont de même valeur efficace. Il est direct si les phases sont ordonnées dans le sens trigonométrique inverse et inverse dans l'autre cas.

2.2. Les tensions délivrées

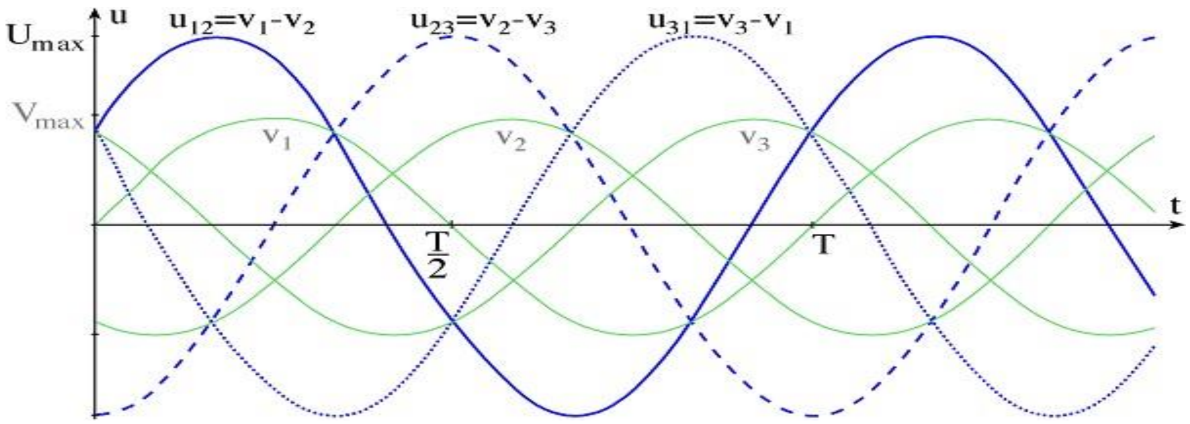


2.2.1. Les tensions simples

Ce sont les d.d.p entre les divers conducteurs de phase et de point neutre: v_1, v_2, v_3.

Ecriture temporelle	**Ecriture complexe** (polaire)
$v_1(t) = V\sqrt{2}\sin(\omega t)$	$\underline{V}_1 = [\ V\ ,\ 0°]$
$v_2(t) = V\sqrt{2}\sin(\omega t - 2\pi/3)$	$\underline{V}_2 = [V\ ,\ -120°]$
$v_3(t) = V\sqrt{2}\sin(\omega t - 4\pi/3)$	$\underline{V}_3 = [V,\ -240°]$

La représentation temporelle de ces tensions est conforme au schéma ci dessous :



2.2.2. Les tensions composées

Ce sont les d.d.p entre les conducteurs des phases consécutives: U_{12}, U_{23}, U_{31}. Voici le détail du calcul pour la tension U_{12} :

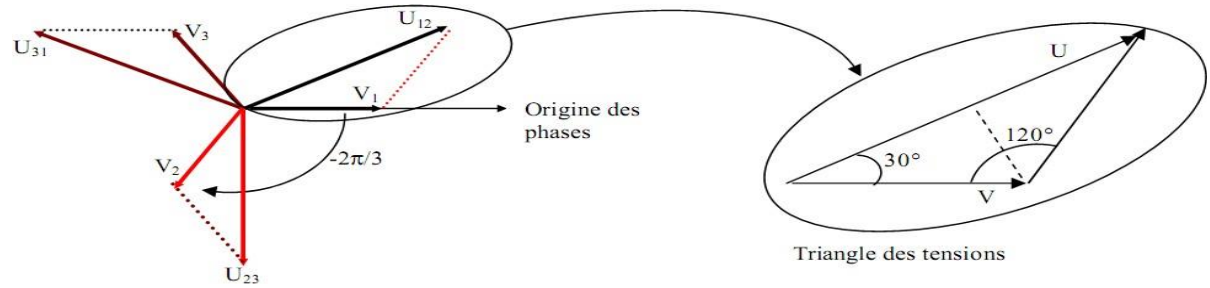
$$\mathbf{U_{12} = V_1 - V_2 = [\ V\sqrt{3}\ ,+\ \pi/6\ ],}$$

En effectuant les mêmes opérations pour les autres tensions, on obtient le tableau ci-dessous :

Ecriture complexe	Ecriture temporelle
$\underline{U}_{12} = \underline{V}_1 - \underline{V}_2 = [\ V\sqrt{3}\ ,\ +30°\ ]$	$u_{12}(t) = V\ \sqrt{3}\sqrt{2}\ \sin(\omega t + \pi/6)$
$\underline{U}_{23} = \underline{V}_2 - \underline{V}_3 = [\ V\sqrt{3}\ ,\ -90°\ ]$	$u_{23}(t) = V\ \sqrt{3}\sqrt{2}\ \sin(\omega t - \pi/2)$
$\underline{U}_{31} = \underline{V}_3 - \underline{V}_1 = [\ V\sqrt{3}\ ,\ +150°\ ]$	$u_{31}(t) = V\ \sqrt{3}\sqrt{2}\ \sin(\omega t - 7\pi/6)$

2.2.3. Représentations des tensions:

A partir des expressions définies précédemment, il est possible de représenter les différentes tensions. La représentation vectorielle de Fresnel des tensions :



Remarque : On voit ainsi apparaître un nouveau système de tensions triphasées : U_{12}, U_{23}, U_{31}. La relation qui existe entre l'amplitude V et U se calcule facilement à partir du triangle des tensions : $2.V.\cos(\pi/6) = U$ c'est à dire : $U = \sqrt{3}.V$

Ainsi, un système triphasé à basse tension sur le réseau est intitulé : 220V / 380V, 220V représentant la tension simple efficace et 380V la tension composée efficace.

II.3. Récepteurs triphasés équilibrés

2.3.1 Définitions

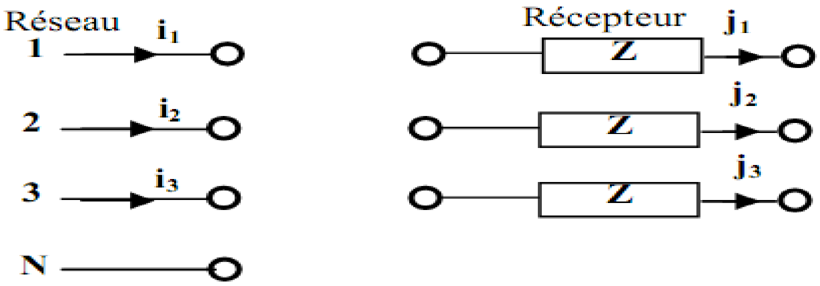
Récepteurs triphasés : ce sont des récepteurs constitués de trois éléments identiques, d'impédance Z.

Equilibré : car les trois éléments sont identiques.

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

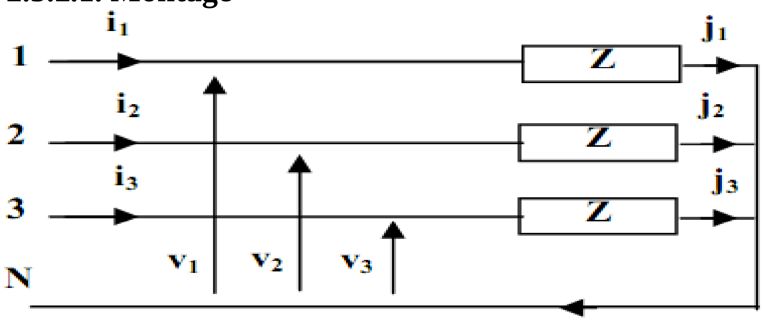
Courants en ligne : c'est le courant dans les fils du réseau triphasé. Symbole : I

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



2.3.2. Couplage étoile :

2.3.2.1. Montage



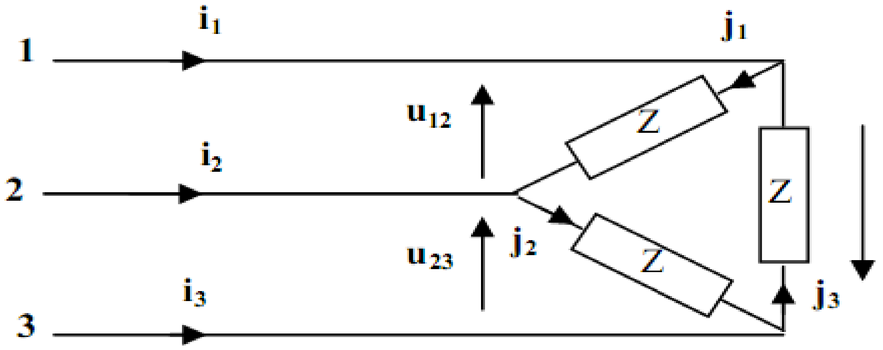
Comme il s'agit des mêmes impédances, de ce fait $i_1 + i_2 + i_3 = 0$, donc $i_N = 0$. Le courant dans le fil neutre est nul. Le fil neutre n'est donc pas nécessaire.

2.3.2.2. Relations entre les courants

On constate sur les schémas précédents que les courants en ligne sont égaux aux courants par phase. $i_1 = j_1$; $i_2 = j_2$; $i_3 = j_3$
De plus la charge et le réseau sont équilibrés, donc : $I_1 = I_2 = I_3 = I = J$
On retiendra pour le couplage étoile : $I = J$

2.3.3. Couplage triangle :

2.3.3.1. Montage



Comme il s'agit des mêmes impédances, $i_1 + i_2 + i_3 = 0$ et $j_1 + j_2 + j_3 = 0$
Ici en aucun cas le fil neutre n'est nécessaire.

2.3.3.2. Relations entre les courants

D'après les schémas du montage triangle :
$i_1 = j_1 - j_3 \Rightarrow I_1 = J_1 - J_3$
$i_2 = j_2 - j_1 \Rightarrow I_2 = J_2 - J_1$
$i_3 = j_3 - j_2 \Rightarrow I_3 = J_3 - J_2$

Le système triphasé est équilibré : $I_1 = I_2 = I_3 = I$ et $J_1 = J_2 = J_3 = J$.
Pour le couplage triangle, la relation entre I et J est la même que la relation entre V et U.
Pour le couplage triangle : $\mathbf{I = \sqrt{3}\, J}$
Remarque :
Les courants J_1, J_2 et J_3 forment un système équilibré déphasé de φ par rapport à celui des tensions composées.

III. Puissances en triphasé

3.1. Théorème de Boucherot (rappel)

Les puissances active et réactive absorbées par un groupement de dipôles sont respectivement égales à la somme des puissances actives et réactives absorbées par chaque élément du groupement.
Remarque : Ce théorème ne s'applique pas aux puissances apparentes, que l'on ne peut cumuler (la puissance apparente est une somme complexe, de composantes pas nécessairement en phase).

3.2. Charge triphasée déséquilibrée (ou quelconque)

Donc d'après ce théorème, la puissance active absorbée par le récepteur est la somme des puissances véhiculées par chaque phase : $P = P_1 + P_2 + P_3$
En cas de charge déséquilibrée, tensions et courants sont déphasés de φ_1, φ_2 ou φ_3 suivant les phases.

La puissance active est: $P = V_1I_1 \cos \varphi_1 + V_2I_2 \cos \varphi_2 + V_3I_3 \cos \varphi_3$

Et la puissance réactive s'écrit alors : $Q = V_1I_1 \sin \varphi_1 + V_2I_2 \sin \varphi_2 + V_3I_3 \sin \varphi_3$

3.3. Charge triphasée équilibrée

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

$\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_3 = \varphi$; $V_1 = V_2 = V_3 = V$ et $I_1 = I_2 = I_3 = I$.

La puissance active a pour expression : $\mathbf{P = 3VI \cos \varphi}$

La puissance réactive est : $\mathbf{Q = 3VI \sin \varphi}$.

La puissance apparente se déduit de la relation : $\mathbf{S = \sqrt{P^2 + Q^2} = 3VI}$

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

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

$\mathbf{Q = \sqrt{3}UI \sin \varphi}$

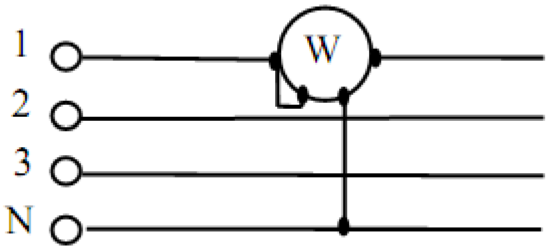
$\mathbf{S = \sqrt{3}UI}$

IV. Mesure de puissance en triphasé

4.1. Circuit équilibré.

Il suffit de mesurer la puissance consommée par une phase et de multiplier par trois. Un seul Wattmètre est nécessaire.

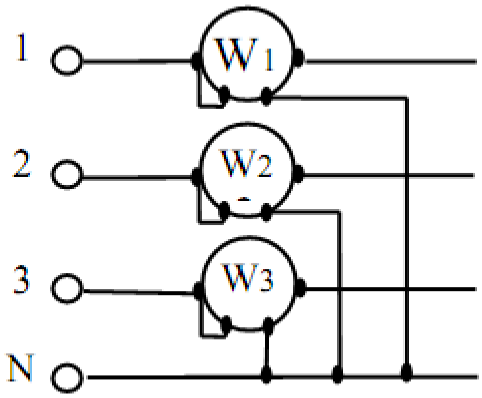
$$\mathbf{P = 3\, P_{1N}}$$



4.2. Circuit déséquilibré.

Il faut mesurer les puissances consommées par les trois phases et additionner. Trois Wattmètre sont nécessaires.

$$\mathbf{P = P_{1N} + P_{2N} + P_{3N}}$$



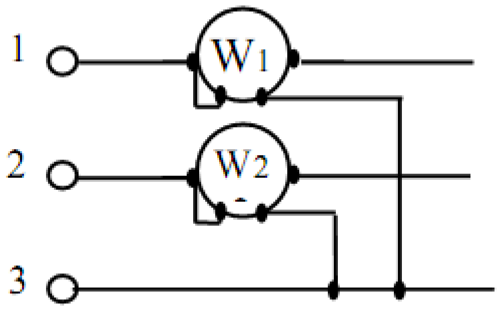
4.3. Méthode des deux Wattmètres

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

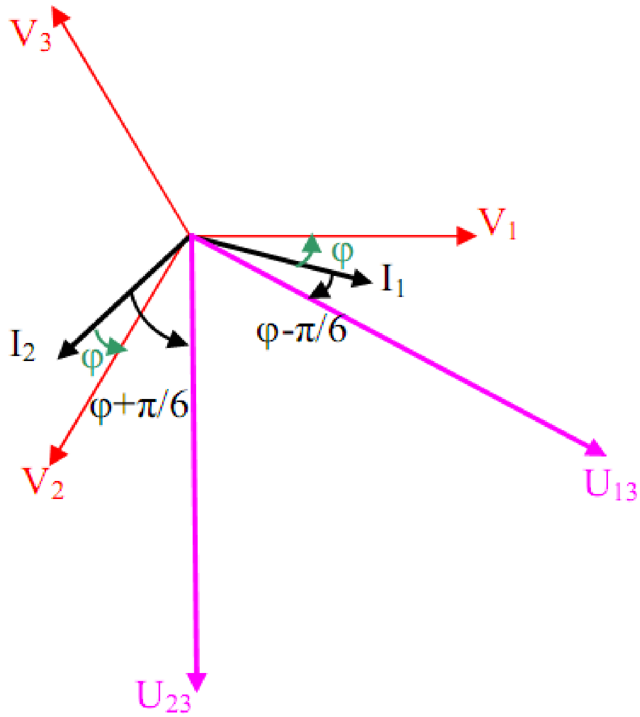
$$\mathbf{P = P_{13} + P_{23}}$$

Remarque :

Le plus souvent on se sert d'un seul wattmètre et d'un commutateur de courant (chahuteur).



Cas particulier :
Le montage des deux wattmètres en régime équilibré :



Les indications des wattmètres donnent :

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

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

Dans ce cas particulier on peut vérifier directement que:

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

$= UI[2.\cos\varphi.\cos \pi/6]$

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

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

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

$= UI[2.\sin\varphi.\sin \pi/6]$

$= UI \sin\varphi$

$P_{13} - P_{23} = Q/\sqrt{3}$ Donc **$\underline{Q = \sqrt{3}\,(P_{13} - P_{23})}$**

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

$Q = \sqrt{3}\,(P_{13} - P_{23})$ où P_{13} et P_{23} sont algébriques

$\mathrm{tg}\, \varphi = Q/P$

V. Amélioration du facteur de puissance " cos φ "

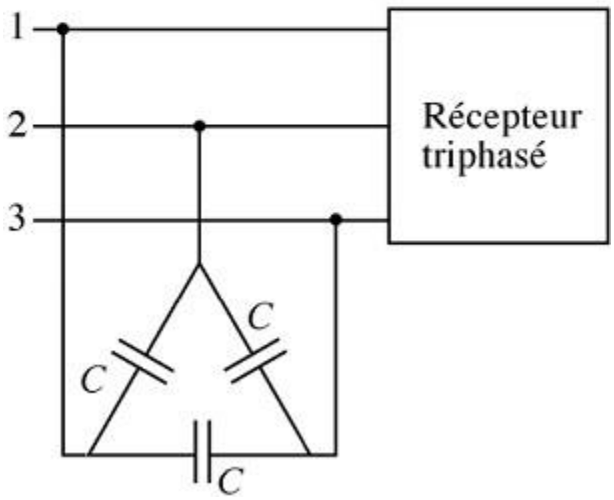
5.1. Pourquoi améliorer le facteur de puissance

Une trop grande consommation d'énergie réactive (facteur de puissance faible) pour une installation électrique va augmenter considérablement ses courants en ligne bien que sa puissance active n'est pas changée.
Pour limiter les courants en ligne et donc l'énergie réactive absorbée par l'installation, on doit donc installer des batteries de condensateurs sources d'énergie réactive en parallèle sur notre installation. On appel cette technique " Compensation de l'énergie réactive ".
Cette compensation permet d'améliorer le facteur de puissance (cos ϕ).

5.2. Calcul de la capacité des condensateurs de compensation

5.2.1. Couplage des condensateurs en triangle

Tension aux bornes d'un condensateur : U
Puissance réactive absorbée par un condensateur : $\mathbf{Q_{C1} = - C\omega\, U^2}$
Puissance réactive absorbée par les trois condensateurs :
$\mathbf{Q_C = 3Q_{C1} = -3C\omega U^2}$



	Puissance active	Puissance réactive	Facteur de puissance
Charge seule	P	$Q = P.\text{tg}\varphi$	On a $\cos\varphi$
Trois condensateurs seuls	0	$Q_C = -3C\omega U^2$	0
Charge + condensateurs	P	$Q' = Q + Q_C = P.\text{tg}\varphi'$	On veut $\cos\varphi'$

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

$$Q_C = -3C\omega U^2 = Q' - Q$$
$$-3C\omega U^2 = P.\text{tg}\,\varphi' - P.\text{tg}\,\varphi$$

Finalement : $$\boxed{C = \frac{P\,(\text{tg}\,\varphi - \text{tg}\,\varphi')}{3\omega U^2}}$$

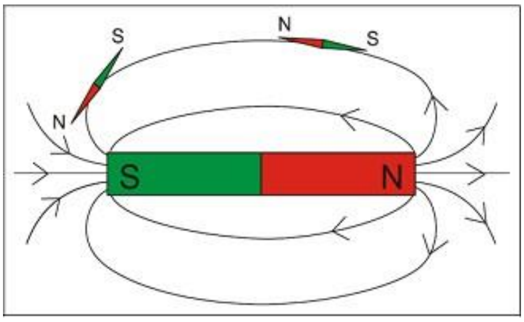
SOMMAIRE PHYSIQUE

Notion sur le champ magnétique

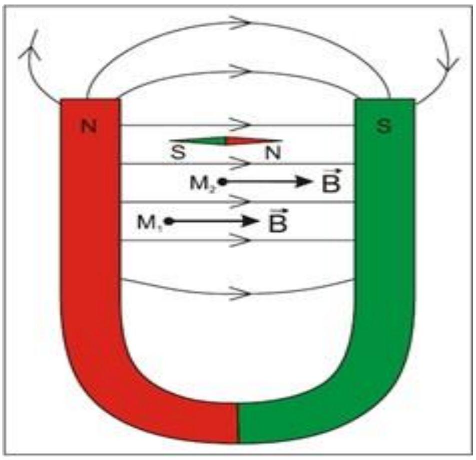
I / Généralités :

1.1/ Aimants :

Les aimants sont des solides qui ont la propriété d'attirer la limaille de fer. Celle-ci forme des houppes aux extrémités de l'aimant. On appelle pôles de l'aimant les régions où la limaille est attirée.



(1)



(2)

(1) - Lignes de champ d'un champ magnétique crée par un aimant droit
(2) - Lignes de champ d'un champ magnétique crée par un aimant en U

Il existe des aimants naturels, formés par certains oxydes de fer comme la magnétite Fe_3O_4 (Suède).
On donne aux aimants artificiels la forme appropriée à leurs usages : barreau droit, aiguille en forme de losange, forme de U ou fer à cheval, anneau, bande magnétique, etc.

1.2 Propriétés :

Le magnétisme est l'ensemble des propriétés présentées par l'aimant.
Les deux pôles d'un aimant ont des propriétés différentes, un est le pôle nord l'autre est le pôle sud. On ne peut pas isoler un pôle magnétique, les pôles de même nom se repoussent, les pôles de noms différents s'attirent.

II/ Champ magnétique :

2.1/ définition du champ magnétique :

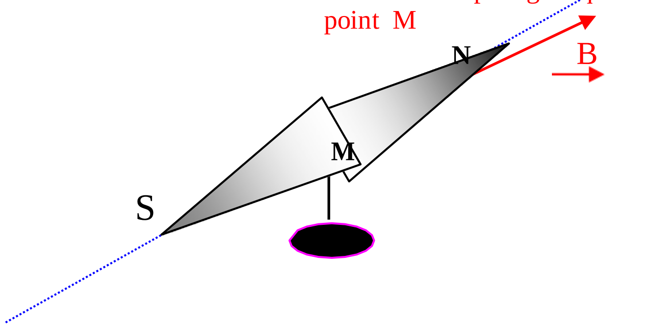
Le champ magnétique est une région d'espace où l'action des aimants (aimants naturels, conducteurs parcourus par un courant électrique, charges électriques en mouvement.) est sensible.

2.2/ vecteur champ magnétique :

Le champ magnétique est caractérisé en chacun de ses points par un vecteur champ magnétique notée : $\vec{B}$. Il est caractérisé par sa direction, son sens, et son intensité.

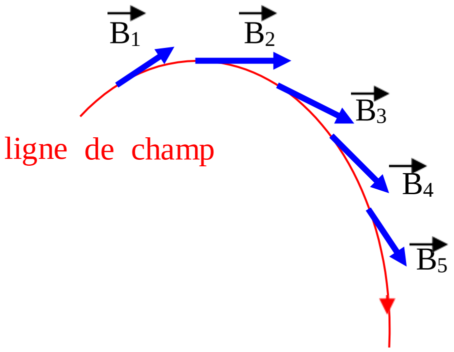
- **La direction et le sens de $\vec{B}$** en un point M sont les même que la direction et le sens $\overrightarrow{SN}$ d'une aiguille aimantée placée en ce point M.

Aiguille aimantée



- **les lignes de champ :**

la ligne de champ est une ligne qui est tangente en chacun de ses points aux vecteurs champs magnétiques.



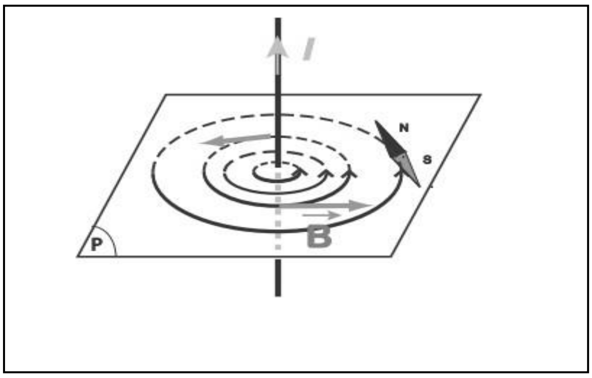
La ligne de champ est orientée dans le sens des vecteurs champ magnétique.

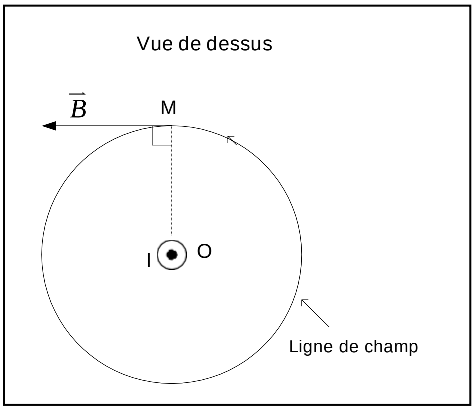
3 - Champ magnétique crée par le courant électrique

3.1 - Cas d'un courant rectiligne

- **Lignes de champ :** Dans un plan perpendiculaire au conducteur traversé par un courant électrique I, les lignes de champ sont des cercles concentriques.

En un point M le vecteur champ magnétique $\vec{B}$ est perpendiculaire au plan défini par le conducteur et le point M.



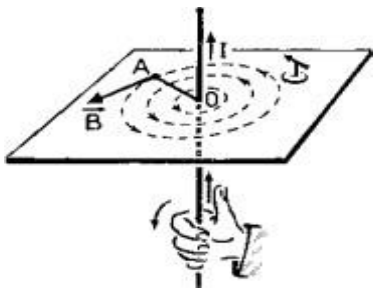


Convention d'écriture pour un vecteur ou un courant perpendiculaire au plan de la feuille :

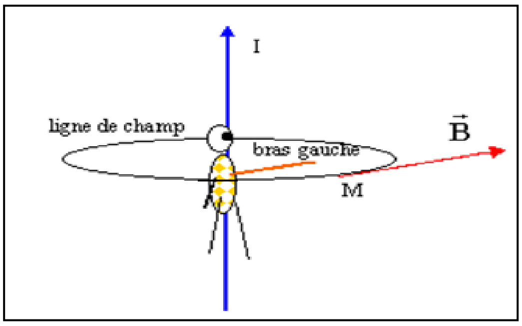
$\odot$: Vecteur ou courant dirigé vers l'avant.

$\otimes$: Vecteur ou courant dirigé vers l'arrière.

- **Sens :** Le sens du champ magnétique dépend du sens du courant électrique. Il obéit aux règles suivantes :
- **Règle de la main droite** : Si le pouce est placé suivant le conducteur dans le sens de circulation du courant I, les autres doigts indiquent le sens des lignes de champ



- **Règle de l'observateur d'ampère**



En un point M $\vec{B}$ est dirigé vers la gauche d'un observateur couché sur le conducteur dans le sens du courant (le courant entre par les pieds et sort par la tête) et regardant dans la direction du point M.

- **Intensité**

Dans le vide, en un point M tel que **OM = d** ; l'intensité du champ est

$B = \frac{\mu_0}{2\pi d} I$. μ_0 est appelée **<u>perméabilité du vide</u>** dans le système international sa valeur est

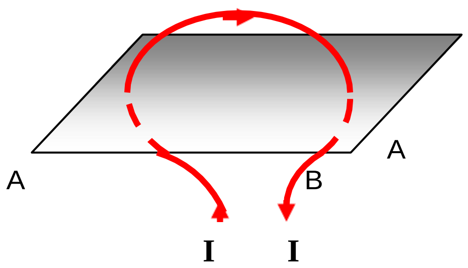
$\mu_0 = 4\pi 10^{-7} SI$ d'où

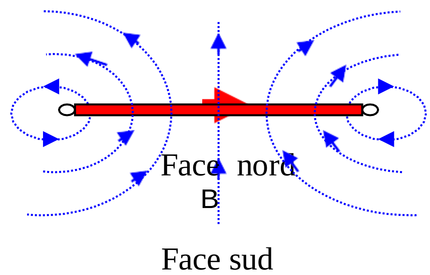
$$\boxed{B = \frac{\mu_0}{2\pi d} I = 2.10^{-7} \frac{I}{d}}$$

- **Application** : un fil conducteur très long parcouru par un courant d'intensité 5A , calculer l'intensité du champ magnétique en un point M situé à une distance l = 2cm du fil. *Réponse : B = 5. 10^{-5} T (tesla)*

3.2 - Cas d'un courant circulaire

Le courant I dans une bobine plate formée de N spires circulaires de rayon R crée un champ Magnétique. la figure montre l'allure des lignes de champ dans un plan perpendiculaire au plan de la bobine et passant par son centre





- **Sens <u>:</u>**

Un fil circulaire, appelé aussi bobine plate, formé de N spires, et de rayon R, parcouru par un courant d'intensité I.

On procède que précédemment pour définir les lignes de champ, un carton horizontal perpendiculaire au plan de la spire et passant par le centre O de la spire.

Par analogie avec un aimant, Les lignes de champ entrent par **la face sud** de la spire et sortent par **la face nord**.

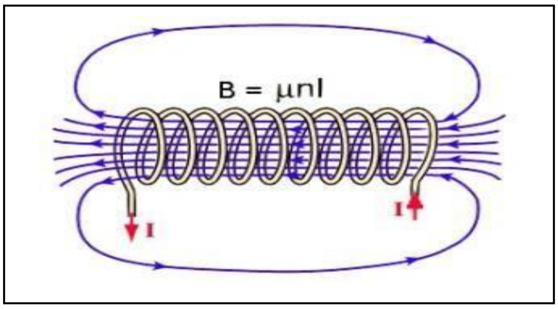
Pour trouver la polarité des faces on utilise soit l'une des deux règles vues (règle d'Ampère, ou celle de la main droite) ou on écrit la lettre N ou S dans le plan de cette face en plaçant des flèches aux extrémités de la lettre, la lettre pour la quelle les flèches marquent le sens du courant indique la polarité de la face.

- **Intensité** $B = \frac{\mu_0 N}{2R} .I = \frac{2\pi .10^{-7} N}{R} .I$

- **Exemple** : Calculons l'intensité du champ magnétique au centre O d'une bobine de 500 spires de rayon R = 4 cm parcourue par un courant I =2A.

Réponse : $B = 15{,}7.10^{-3}$ T.

3.3 Cas d'un solénoïde



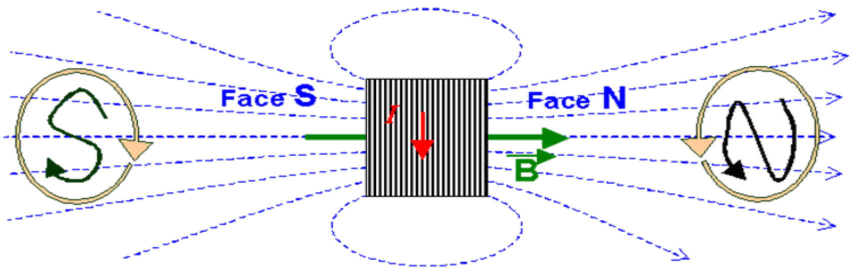
Le solénoïde est une bobine de longueur L très grand devant son diamètre d (L ≥ 8 à 10d)) À l'intérieur d'un solénoïde les lignes de champ sont des droites parallèles : le champ magnétique est uniforme. Son intensité est :

$$B = \mu_0 n I = 4\pi.10^{-7}.n.I$$

OÙ $n = \dfrac{N}{l}$ est le nombre de spires par unité de longueur

- **Faces d'une bobine**

Par analogie avec les aimants : la <u>face sud</u> d'une bobine sera la face par laquelle entrent les lignes de champ .et <u>la face nord</u> sera la face par laquelle elles sortent



- **Application** : un solénoïde de longueur L = 40cm, parcouru par un courant d'intensité I = 2A, l'intensité du champ magnétique au voisinage du centre de son centre :

$B = 8.\ 10^{-3}$ T.

1. Calculer le nombre de spires ?
2. Quelle serait l'intensité de ce champ si le solénoïde était parcouru par un courant d'intensité I'= 0,5A ? Réponse N = 1270 spires. $B' = 20.\ 10^{-4}$ T

Exercice -1 On considère deux aimants droits d'axes perpendiculaires.

Au point M (intersection des deux axes), l'aimant (1) produit un champ B_1 = 30mT et l'aimant (2) produit un champ B_2 = 20mT. Faire un schéma, Dessiner $\vec{B}_1$ et $\vec{B}_2$

Dessiner le champ résultant $\vec{B}$ et calculer son intensité B en mT.

Exercice -2 Une bobine de longueur L = 20 cm comporte N=1000 spires de diamètre d = 2cm. Elle est traversée par un courant d'intensité I = 200 mA.

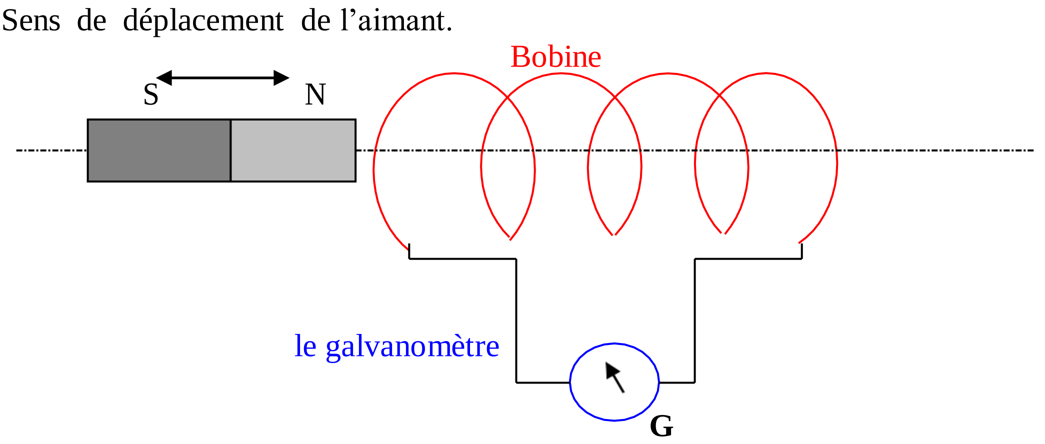
1) Peut-on considérer cette bobine comme solénoïde?
2) Quelle est l'intensité du champ magnétique à l'intérieur ?
3) Pour quelle valeur de I, l'intensité du champ est-elle égale à B_h ?

Où $B_h = 2.10^{-5}$T est l'intensité de la composante horizontale du champ magnétique terrestre.

INDUCTION ELECTROMAGNETIQUE :

1./ Etude quantitative :

Expérience avec un aimant :



Prenons une bobine de 1200 spires, nous la relions à un galvanomètre G à 0 central.

- Approchons de la face **gauche** de la bobine le pôle **N** de l'aimant, l'aiguille du galvanomètre dévie vers la **droite.**
- Eloignons de la face **gauche** de la bobine le pôle **N** de l'aimant, l'aiguille dévie vers la **gauche.**
- Approchons de la face **gauche** toujours, le pôle **S** de l'aimant, l'aiguille dévie vers la **gauche**.
- Eloignons de la face **gauche** toujours, le pôle **S** de l'aimant, l'aiguille dévie vers la **droite.**

Dans chacun des quatre cas un courant a circulé dans la bobine puisque l'aiguille du galvanomètre a dévié. Il s'est donc produit aux bornes de la bobine une f.e.m dite f**.e.m. d'induction.**

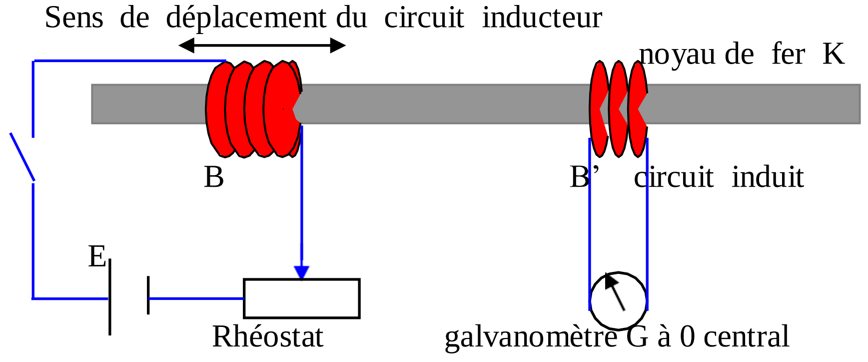
Ce phénomène s'appelle : **induction électromagnétique.** L'aimant est **l'inducteur.** La bobine est **l'induit.**

La cause de cette création de f.e.m est une modification, à l'intérieur de la bobine, d u champ magnétique provoqué par une variation du flux à travers les spires de la bobine.

LOI de FARADY :

Toute variation de flux à travers un circuit électrique engendre une f.e.m. d'induction.

Expérience avec un courant :

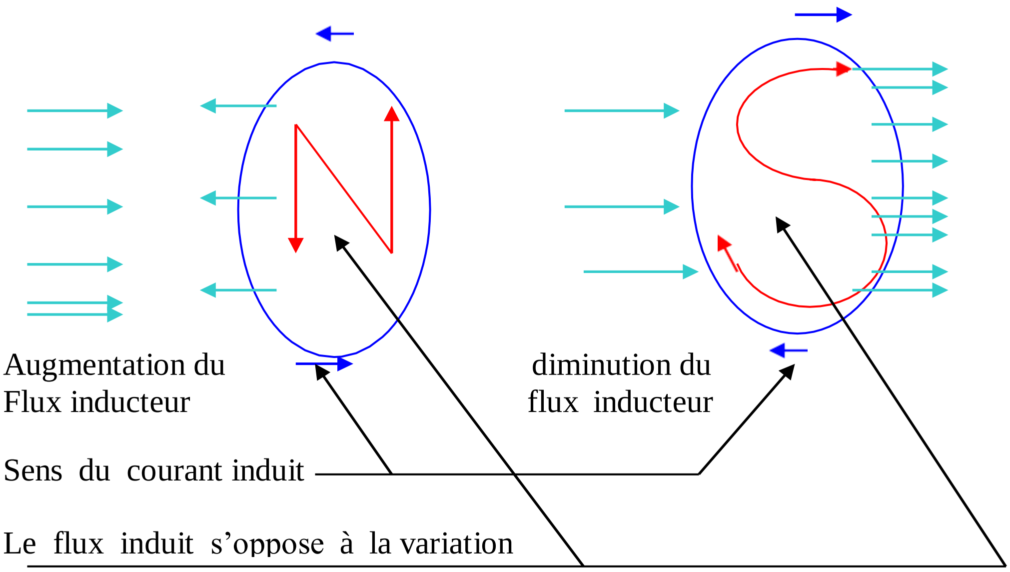


le circuit inducteur comporte une bobine de 600 spires, une batterie d'accumulateur, un interrupteur K, et un rhéostat pour faire varier l'intensité de courant dans la bobine.
Le circuit induit comporte une bobine de 20 spires et un galvanomètre.

- Eloignons ou rapprochons B' de B le galvanomètre dévie à droite ou à gauche.
- Ouvrant ou fermons l'interrupteur K, la même chose, G dévie fortement à droite ou à gauche.
- Faisant varier l'intensité du courant dans B, G dévie.

Toute variation du flux à travers un circuit électrique donne naissance à une f.e.m. induite dans ce circuit.

2/ Lois des inductions électromagnétiques :
d'après les deux expériences vues au-dessus nous avons vu que le galvanomètre change de déviation suivant qu'il y a augmentation ou diminution de flux.
Le courant induit a la même durée que la variation du flux.



Conclusions :
Loi de Lenz. La f.e.m. induite a un sens tel que le flux qu'il crée s'oppose à la variation de flux inducteur.

La f.e.m induite est directement proportionnelle à la grandeur $\Delta\Phi$ de la variation du flux inducteur.
La f.e.m induite est inversement proportionnelle à la durée **Δt** de la variation du flux inducteur.

$$\boxed{\mathbf{E = \Delta\Phi / \Delta t}}$$

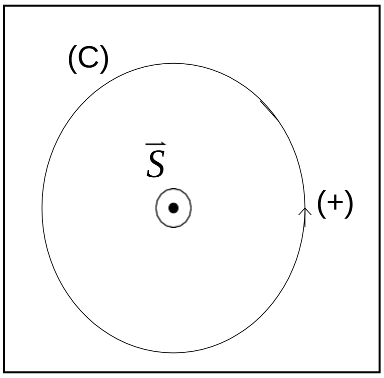
E : en volt (V)
$\Delta\Phi$: en Webers (Wb)
Δt : en seconde (s)

3 - Le flux magnétique

3.1 - Le vecteur surface

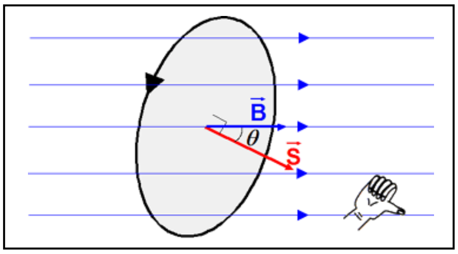
Considérons un contour fermé C limitant une surface plane S. Orientons arbitrairement ce contour et définissons le vecteur surface $\vec{S}$ par :

- **Origine** : un point de la surface.
- **Direction** : normale à la surface.
- **Sens :** règle de la main droite(le pouce de la main droite indique le sens de $\vec{S}$ quand les autres doigts sont placés dans le sens positif.
- **Module** : valeur S de l'aire de la surface.



3.2 - Le flux magnétique

Si le contour est placé dans un champ magnétique uniforme $\vec{B}$, on définit le **flux Φ du champ magnétique** $\vec{B}$ à travers la surface plane S limitée par le contour (C) par la relation :



$$\boxed{\Phi = \vec{B}\cdot\vec{S} = B.S.\cos(\theta)}$$

θ = angle ($\vec{B}$, $\vec{S}$)

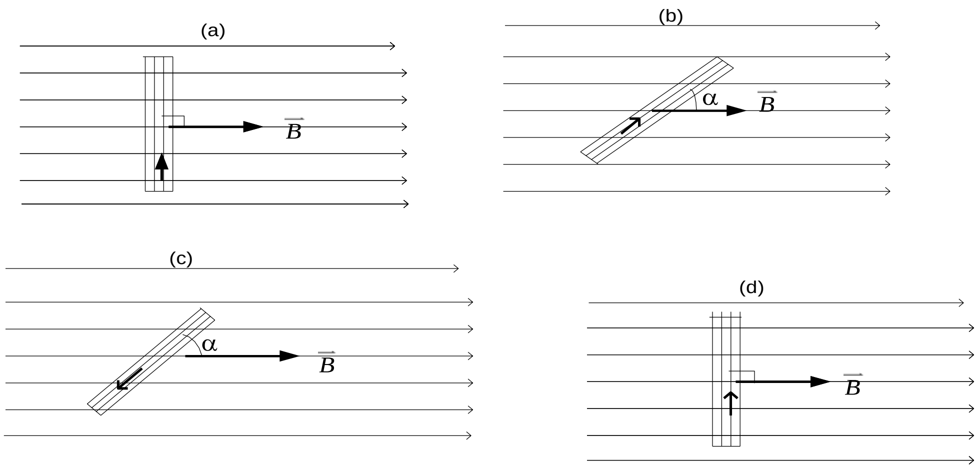
$\vec{B}$ s'exprime en Teslas (T), S en (m^2) et Φ en Webers (Wb)

NB : pour une bobine comportant N spires, le flux total est N fois le flux à travers une spire soit **$\Phi_T = N.\Phi$.** Le flux est une grandeur algébrique son signe dépond de l'angle θ = $(\vec{B},\vec{S})$

Exercice

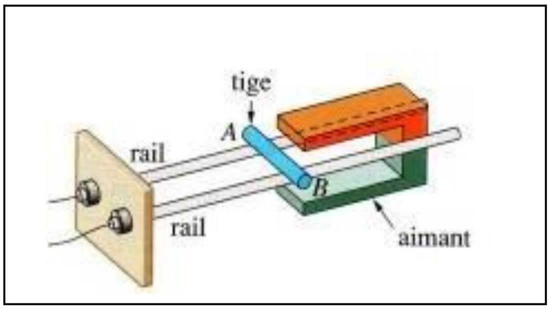
Dans les figures (a) ;(b) ;(c) et (d) on a représenté quatre positions d'une bobine circulaire de rayon R = 3cm, comportant N = 50 spires dans un champ magnétique uniforme B = 0,10mT .

1. Représentez dans chaque figure le vecteur surface associé à la bobine.
2. Calculez dans chaque cas le flux magnétique qui traverse cette bobine avec α = 30°.



LA FORCE ELECTROMAGNETIQUE

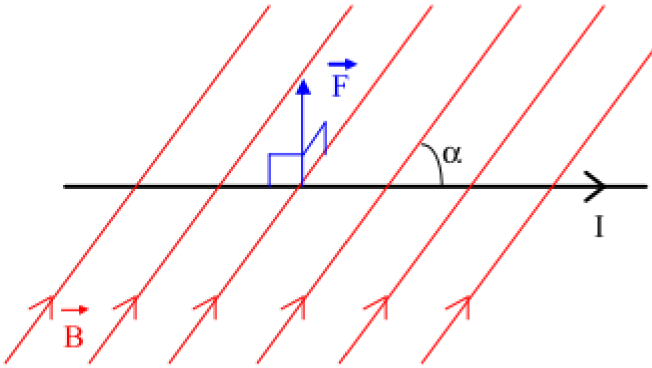
1/ mise en évidence



Une tige AB conductrice de section cylindrique est posée sur des rails conducteurs horizontaux et parallèles.
La tige est placée dans l'entrefer d'un aimant en U.
Lorsque le courant circule dans la tige conductrice et que celle-ci est dans le champ magnétique de l'aimant, elle se met en mouvement.

2/ Loi de Laplace

Tout conducteur parcouru par un courant d'intensité I, placé dans un champ magnétique $\vec{B}$, est soumis à une force électromagnétique $\vec{F}$ appelée force de Laplace. Ses Caractéristiques sont :

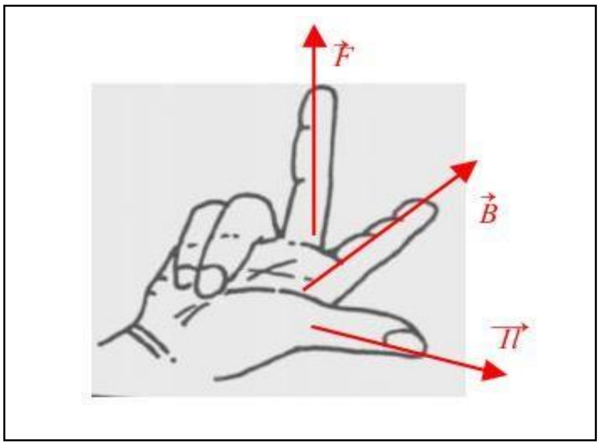


- **la direction** de la force est orthogonale au plan formé par le vecteur $\vec{B}$ et le conducteur.
- **le sens** de la force est donné par la **règle des trois doigts de la main droite :**

Pouce = $\overrightarrow{Il}$

Index = $\vec{B}$

Majeur = $\vec{F}$



Ou

La Règle de l'observateur d'ampère

$\vec{F}$ est dirigée vers la gauche d'un observateur placé sur le conducteur dans le sens du courant (le courant entre par les pieds et sort par la tête), et regardant dans le sens de $\vec{B}$

Intensité: elle est donnée par l'expression: **F = B.I.L sinα**

B en (T) , I en (A) , F en (N) et L en (m)
L: longueur du conducteur immergé dans le champ magnétique
α : Angle ($\vec{B}$; $\overrightarrow{Il}$)

Remarque

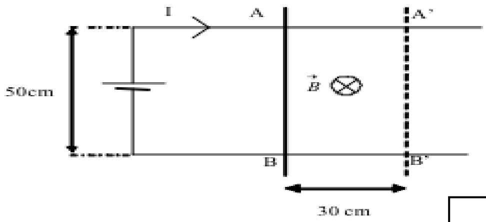
Si $\vec{B}$ et $\overrightarrow{Il}$ sont colinéaires (α = 0) l'intensité de la force est nulle (F= 0)

Si $\vec{B}$ et $\overrightarrow{Il}$ sont perpendiculaires (α = 90°) l'intensité est maximale (F= B.I.L)

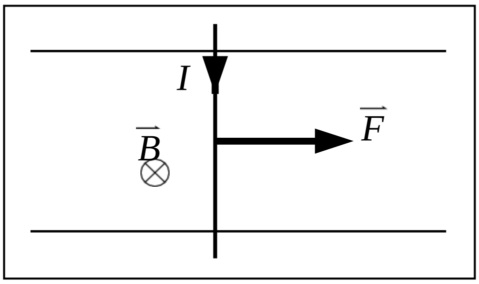
Exercice

Une barre de fer de 50cm de longueur, pouvant se déplacer sur deux rails conducteurs et horizontales l'ensemble est placé dans un champ magnétique vertical d'intensité B = 1,5T. L'intensité du courant d'alimentation est 5A. (voir figure)

1) Déterminez les caractéristiques de la force électromagnétique appliquée au conducteur.
2) Calculez le travail mécanique effectué par la force quand la barre se déplace de AB à A'B'.



Corrigé :

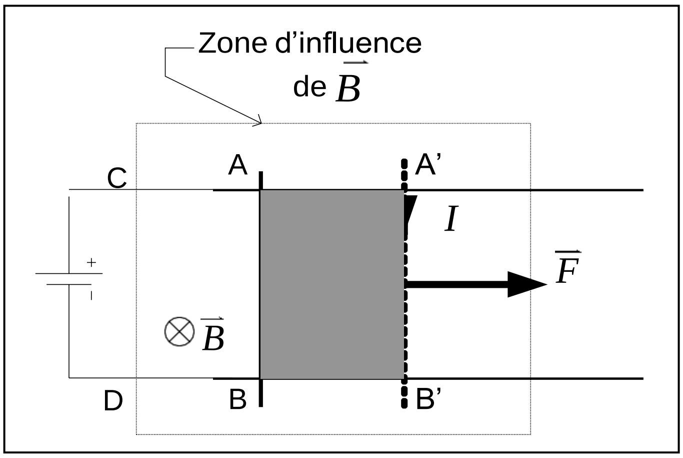


1/ -Direction et sens (Voir figure)

- Intensité : F = B.I.L.sinα avec α = π/2 ; et L = AB = 50cm

⇒ F = B. I.L

⇒ F = 1,5x5x0,5 = 3,75 N ⇒ **F = 3,75N**



2/ Travail de $\vec{F}$

$W(\vec{F}) = \vec{F}.\overrightarrow{AA'} = F.AA'\cos(\vec{F}.\overrightarrow{AA'})$.

$l'angle(\vec{F}.\overrightarrow{AA'}) = 0$; et F = I.L.B

$\Rightarrow W(\vec{F}) = I.B.L.AA'$

$\Rightarrow W(\vec{F}) = 5x1,5x0,3x0,5 \Rightarrow W(F) = 1,25J$

3/ Travail des forces électromagnétiques

Reprenons l'exercice précédant : Le travail de la force électromagnétique exercée sur la barre :

$W(\vec{F}) = I.B.L.AA'$; **L.AA' = aire S** de la surface du rectangle AA'B'B (surface balayé par la barre lors de son déplacement). $\Rightarrow W(\vec{F}) = I.B.S$

B.S représente le flux du champ magnétique à travers la surface balayée on l'appelle **flux coupé** noté Ø$_C$.

Donc
$$W(\vec{F}) = I.\phi_c$$

Si on note par **si** : la surface du rectangle CABD (surface du circuit immergé dans le champ magnétique à l'état initial) et par Sf : la surface du rectangle $\overrightarrow{C}$A'B'D (surface du circuit immergé dans le champ à l'état final).

$$W(F) = I(B.S_f - B.S_i)$$

La surface balayé par la barre est : S = (Sf - Si) et soit $$W(F) = I(\phi_f - \phi_i)$$

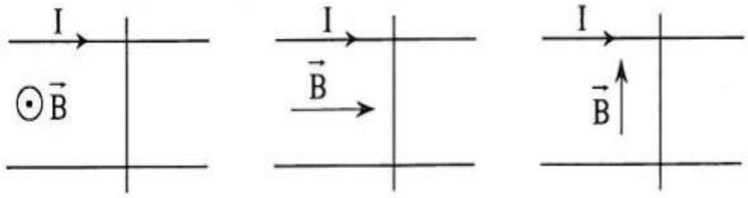
Ce résultat est général :
Lors du déplacement ou de la déformation d'un circuit électrique, parcouru par un courant d'intensité **I** dans un champ magnétique B, le travail de l'ensemble des forces électromagnétiques a pour expression :

$$\boxed{W = I(\varnothing_f - \varnothing_i)}$$

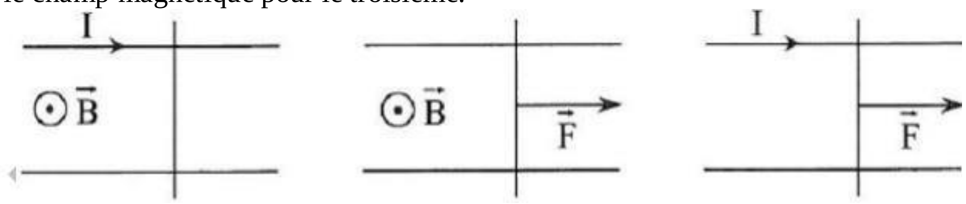
où **$\varnothing_i$:** flux à l'état initial
$\varnothing_f$: Flux à l'état final

Exercice -1

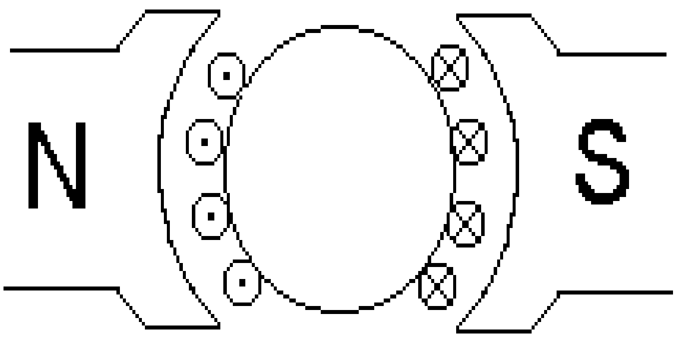
Indiquez dans quel(s) cas une force électromagnétique s'exerce sur la tige placée sur les deux rails. justifiez la réponse en précisant la direction et le sens de la force.



Complétez les schémas suivants en indiquant pour chacun, la caractéristique manquante :
-la force de Laplace pour le premier.
-le sens du courant pour le deuxième.
-le champ magnétique pour le troisième.



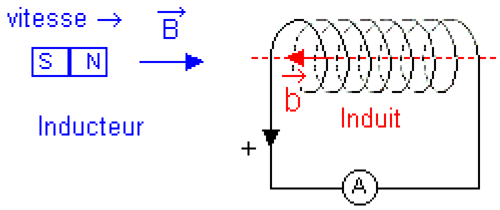
Exercice 2
On considère le moteur électrique simplifié suivant. Le champ magnétique est radial (C'est à dire perpendiculaire à la paroi de l'entrefer) et vaut B = 0,8 T ; le nombre de spires N = 100 spires, la longueur active des conducteurs L = 10 cm. et l'intensité du courant dans les spires I = 5 A
Représenter sur le schéma le sens des vecteurs champs magnétiques sur les 8 conducteurs.
En déduire la force (direction, sens et intensité) que subit un conducteur actif de chaque coté du rotor, donner le sens de rotation du moteur.



INDUCTION ELECTROMAGNETIQUE

1/ Lois de Lenz

La **loi de Lenz** permet de déterminer le sens du courant induit :
Le sens du courant induit est tel que par ses effets il s'oppose à la cause qui lui a donnée naissance
Exemple



- Lorsqu'on approche le pôle Nord (N)de l'aimant (inducteur) de la bobine (induit) celle-ci sera soumise à un champ magnétique $\vec{B}$ variable. Le sens du courant électrique induit sera tel que la face gauche de la bobine soit une face nord (N) tentant de repousser l'aimant. Le champ magnétique induit $\vec{b}$ doit être dirigé vers la gauche. On en déduit, d'après la règle de la main droite, que le courant induit doit circuler dans le sens positif.

- C'est le travail mis en jeu pour déplacer l'aimant inducteur qui devient, en partie, énergie électrique dans le circuit induit. En effet, il faut vaincre la répulsion que la face nord (N) de la bobine exerce sur le pôle Nord (N) de l'aimant qui s'approche

2/ loi de faraday

Une analyse expérimentale plus poussée montre que c'est la variation du flux magnétique à travers un circuit qui crée dans celui-ci, une force **électromotrice (f.e.m) induite** ,donc un **courant induit** traverse le circuit s'il est fermé.

L'expression de cette fem est:

où $\frac{d\Phi}{dt}$ est la dérivée du flux par rapport au temps

$$\boxed{e = -\frac{d\Phi}{dt}}$$

Si R est la résistance du circuit, l'intensité du courant induit est : $i = \frac{e}{R}$

Soit

$$\boxed{i = -\frac{1}{R}\frac{d\Phi}{dt}}$$

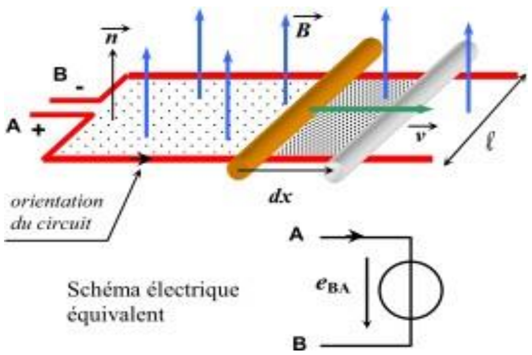
Exercice corrigé

•

Exercice 2

Une tige conductrice MN glisse perpendiculairement sur deux rails conducteurs avec la vitesse V = 2m/s. l'ensemble est placé dans un champ magnétique uniforme dont les lignes de champ sont perpendiculaires au plan des rails, et d'intensité B = 0,4T
Calculez la fem induite dans le circuit sachant que la distance entre les deux rail est l = 10Cm
Donnez le schéma électrique équivalent du circuit et identifiez ses pôles

Corrigé



1) On choisi un sens positif arbitraire (mais il vaut mieux choisir un sens positif qui donnerait un flux positif). Si le conducteur mobile se déplace de dx pendant l'intervalle de temps dt, l'aire S du circuit augmente de ds = l dx, le flux varie de **dϕ = B.ds =B l dx**, cela va engendrer une f.e.m. $e = -\frac{d\Phi}{dt} = -B.l\frac{dx}{dt}$

$\Rightarrow$ $e = -B.l.v$ $\Rightarrow$ **e = - 0,4x0,1x2 = - 0,08V**

D'après le sens positif choisi $e = U_{BA} = V_B - V_A$; on a $e < 0 \Rightarrow V_B < V_A$

$\Rightarrow$ **Le pole (+) en A et le pole (-) en B**