Syllabus d'électricité

G. Barmarin

2012-2013

"La science, son goût est amer au début
mais à la fin, plus doux que le miel"

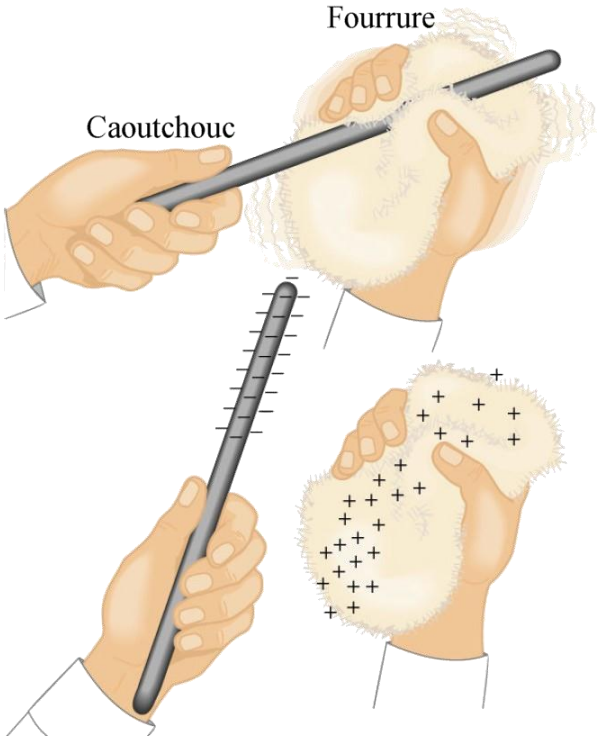
(Plat à décor épigraphique
XI-XIIème siècle, Iran ou Transoxiane
Le Louvre - Arts de l'Islam)

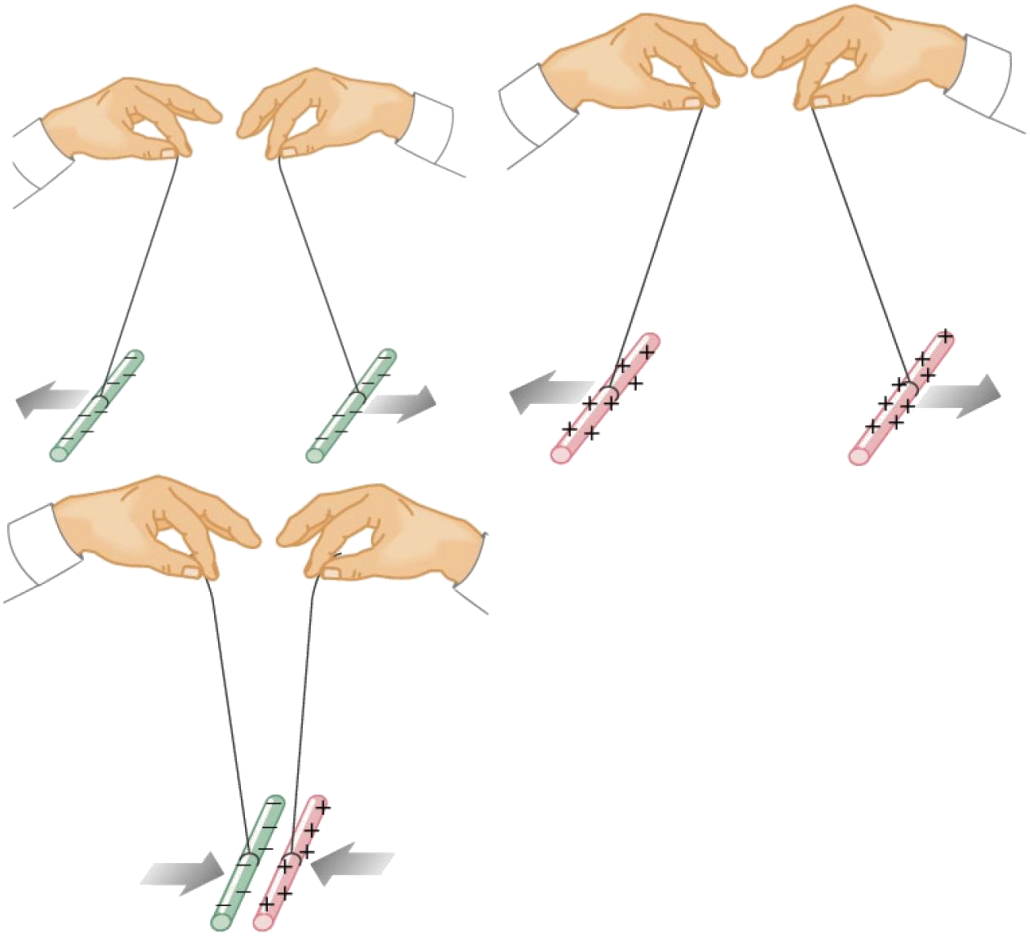
Table des matières

Electrostatique

Histoire

Expérience :

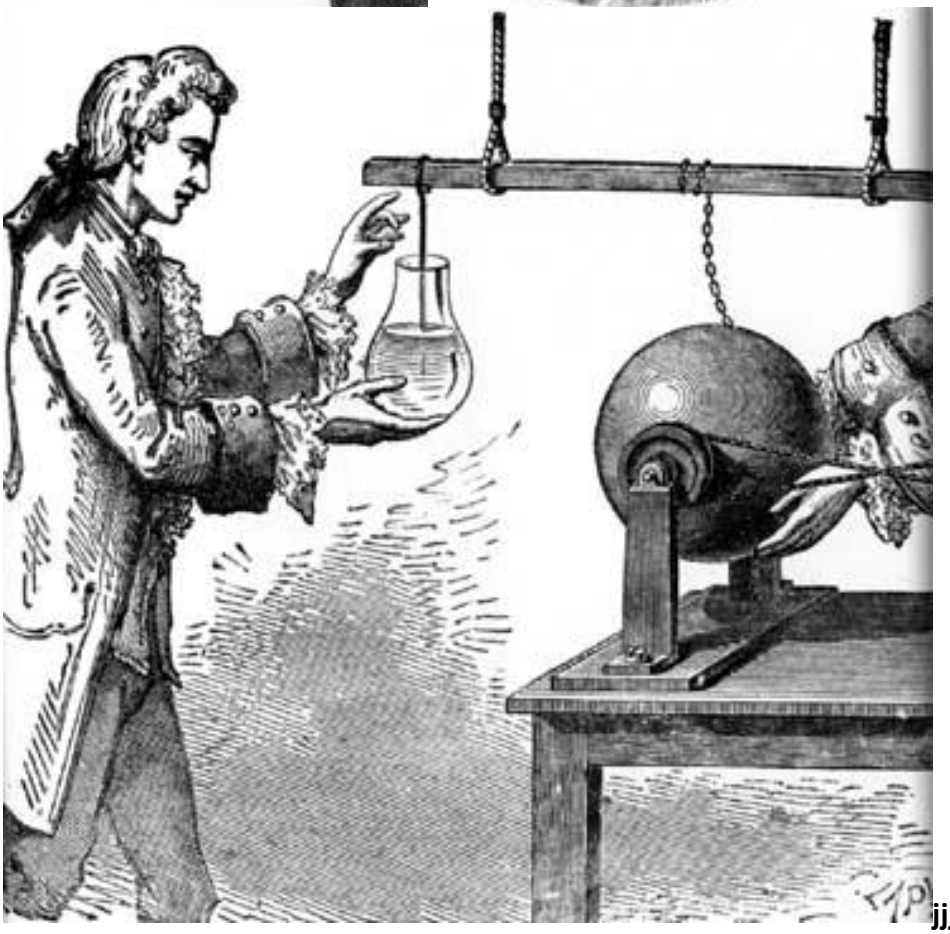




Conclusion : il existe deux types de charges que l'on qualifiera de positive et négative

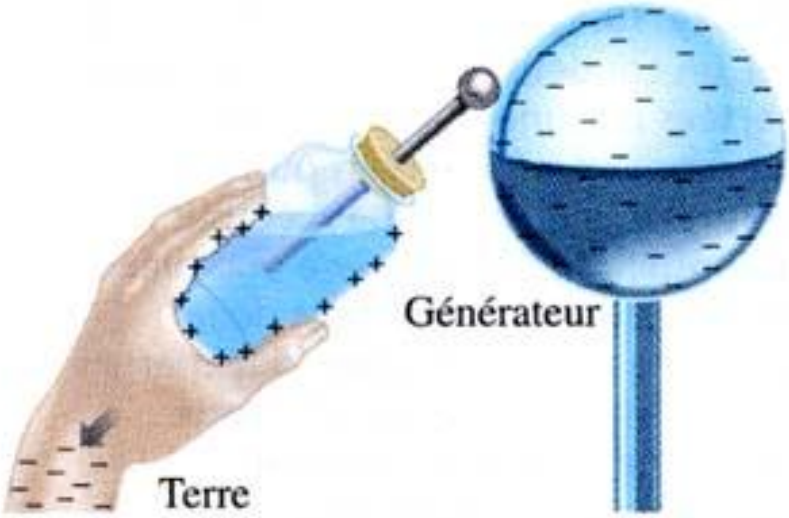
Charge électrique

Condensateurs



jjj

La bouteille de Leyde

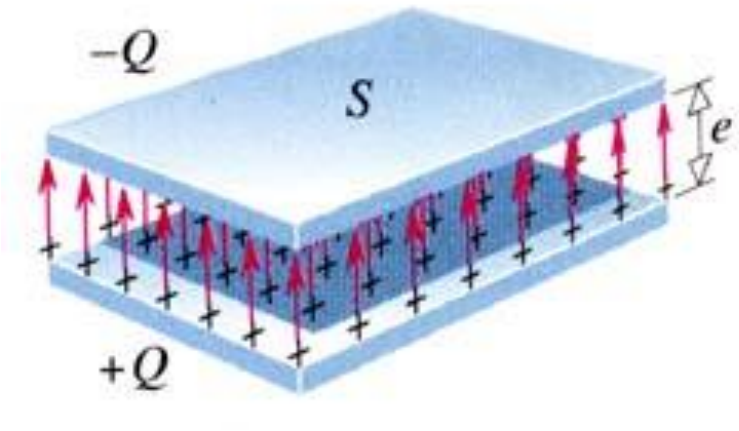


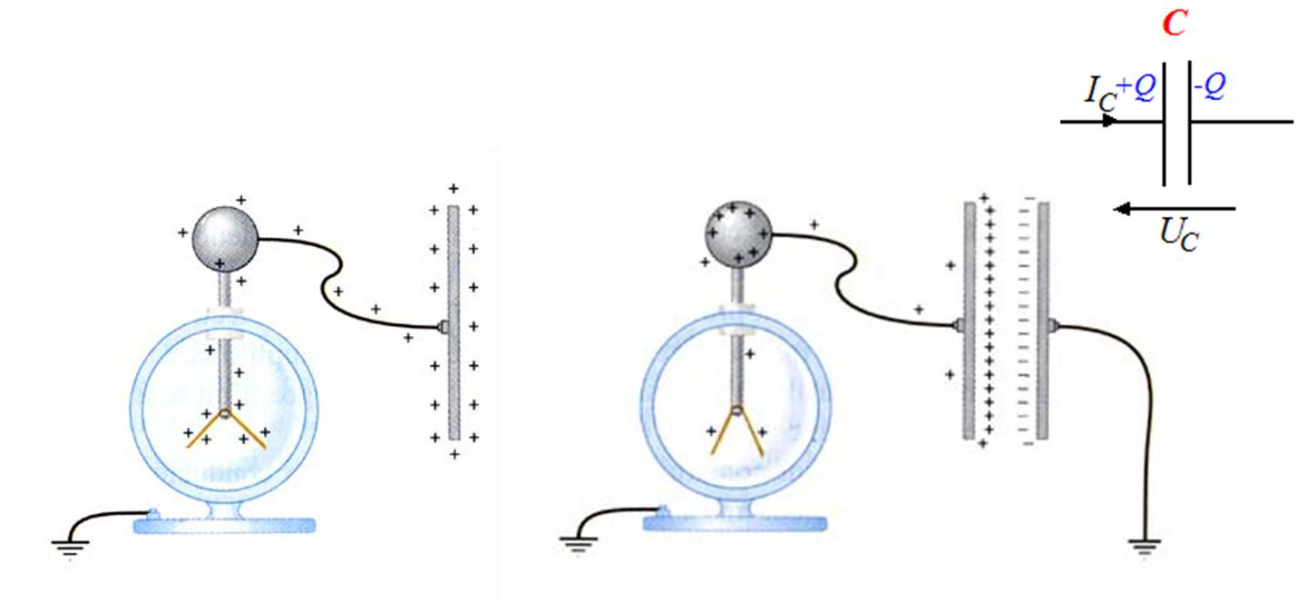
Benjamin Franklin a l'intuition que la décharge de la bouteille de Leyde est liée à une remise à l'équilibre des deux excès d'électricités, notés + et -, existant dans la bouteille.

Les condensateurs

La bouteille de Leyde de Franklin, aplatie, est un **condensateur plan**.

Un condensateur plan est constitué de deux armatures métalliques misent en regard l'une de l'autre et séparées par un diélectrique (isolant). Les deux armatures forment les deux bornes du dipôle ainsi constitué.





Autrement dit, la capacité *C* est proportionnelle à la charge *Q* et inversement proportionnelle à la différence de potentiel U_C :

$C = Q/U_C$.

L'unité de charge est le **Coulomb (C)**, l'unité de différence de potentiel, le **Volt (V)** et l'unité de capacité, le **Farad (F)** en l'honneur de l'un des plus grands expérimentateurs de l'histoire des sciences, Michael Faraday.

La force électrostatique

Deux charges de même type se repoussent, deux charges de types différents s'attirent.

$$F_E = k.\frac{q_1 \cdot q_2}{r^2}$$

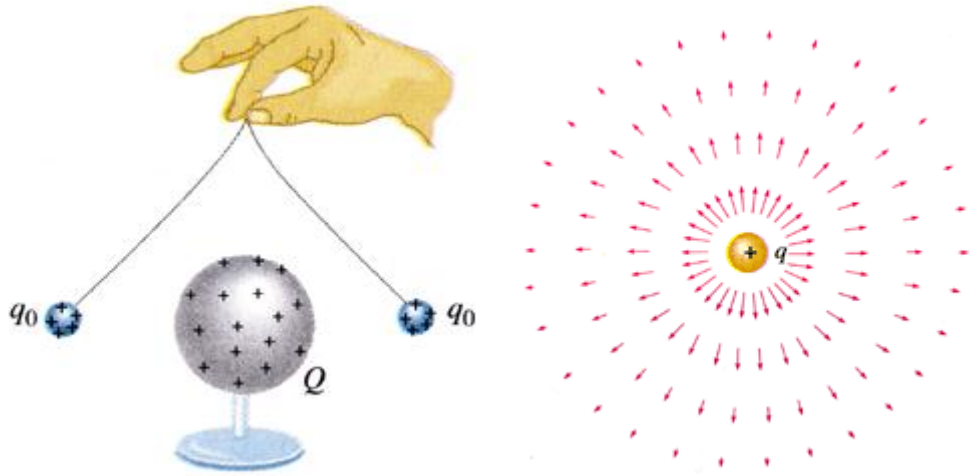
La force est proportionnelle à la charge et inversement proportionnelle au carré de la distance séparant les charges

Champ électrique

Ainsi, quelle que soit sa source, nous définissons le champ électrique (E) en chaque point de l'espace comme la force électrique que subit en ce point une charge d'essai positive, divisée par cette charge :

$$E = F/q_0 \ .$$

L'unité de champ électrique est le **Newton par Coulomb (N/C)**, de force, le **Newton (N)** et de charge, le **Coulomb (C)**.



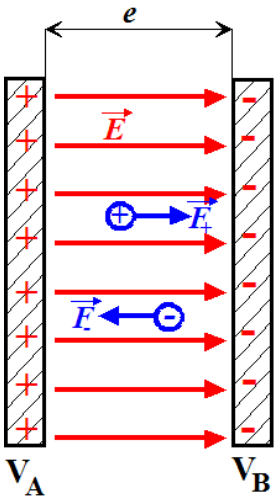
Inversement, connaissant E en tout point de l'espace (quelle que soit la source) nous pouvons calculer la force F qui agit sur une charge ponctuelle q placée en ce point :

$$F = q \times E.$$

les deux vecteurs *F* et *E* sont orientés dans le même sens si *q* est positive et en sens inverse si *q* est négative.

Champ uniforme

Le champ électrique en tout point de l'espace situé entre les deux armatures d'un condensateur plan est *uniforme*. Ce qui signifie qu'il a même intensité, même direction, même sens.



Le module du champ électrique *E* situé entre les armatures d'un condensateur plan est égal à la différence de potentiel V_A - V_B entre ces deux armatures divisé par l'épaisseur *e* du condensateur:

$$E = (V_A - V_B)/e$$

La différence de potentiel s'exprime en Volt(V), l'épaisseur en mètre (m), donc le champ électrique peut aussi s'exprimer en volt par mètre (V/m)

Les diélectriques et les champs électriques

Les conducteurs et les isolants : petits rappels

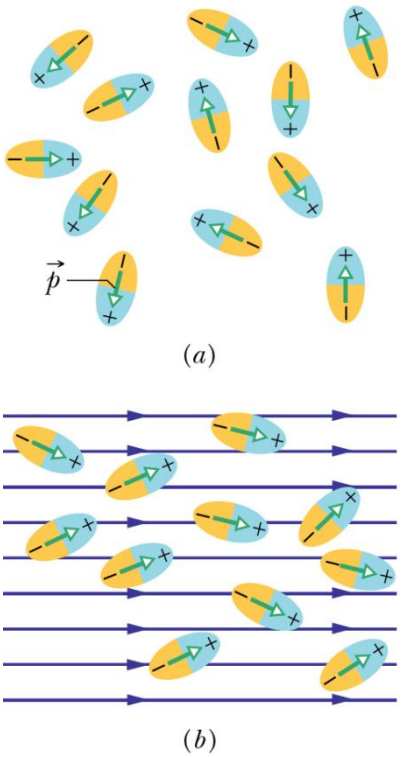
Dans certaines types de matériaux, p. ex. le métal, l'eau du robinet et le corps humain, une partie de la charge négative se déplace librement. Ces matériaux sont appelés des ***conducteurs***.

A l'intérieur des autres matériaux, notamment le verre, l'eau pure et le plastique, la charge se déplace plus difficilement. Ces matériaux sont appelés ***non-conducteurs***,***isolants*** ou ***diélectriques***.

Les diélectriques

Diélectriques polaires

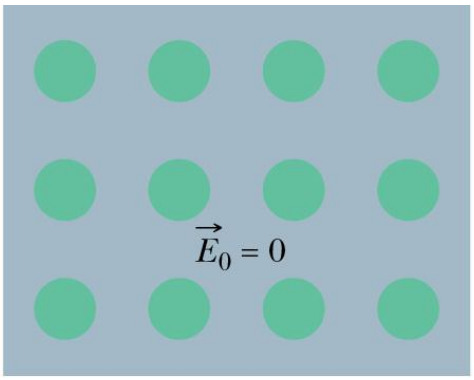
Les diélectriques polaires ont des moments dipolaires électriques permanents, p.ex. H_2O. Les dipôles électriques dans ce genre de matériaux ont tendance à s'aligner avec un champ électrique externe. L'alignement se produit mécaniquement, à cause du couple qui agit sur le dipôle.



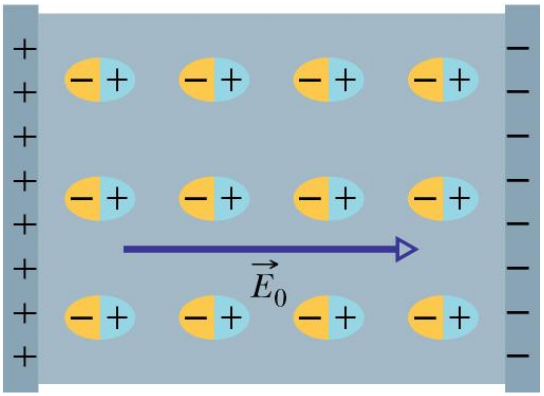
En a : le champ est nul E = 0 en b, on applique un champ E

Diélectriques non polaires

Les diélectriques non polaires n'ont pas de moments dipolaires électriques permanents, mais acquièrent des moments dipolaires par induction quand ils sont placés dans un champ électrique externe.



(a)



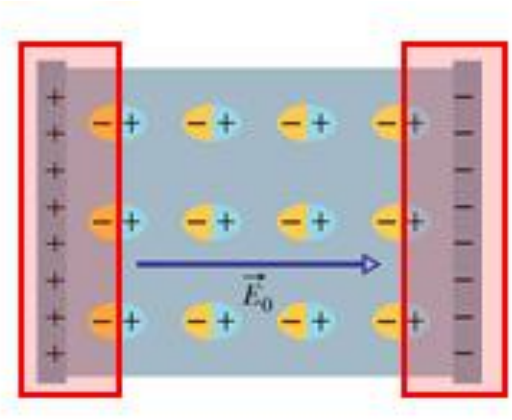
Les moments dipolaires de chaque molécule sont produits par le champ externe. Les dipôles sont donc tous alignés avec le champ externe à cause de ce processus d'induction.

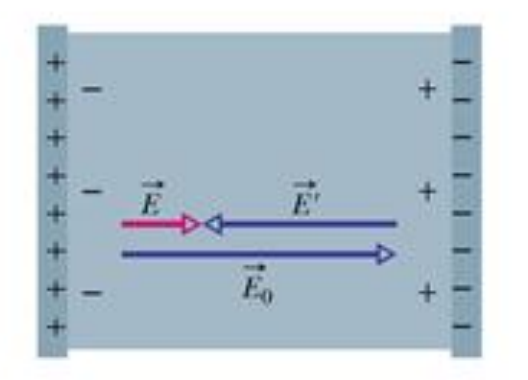
L'alignement des dipôles électriques d'un diélectrique, soit par rotation ou induction, est nommé la polarisation électrique

Le champ électrique interne

Étant donné un matériau diélectrique situé entre deux plaques chargées. Les plaques produisent un champ électrique uniforme E_0.

Aux extrémités du diélectrique, on trouve une légère charge nette, à cause de la séparation des charges négatives et positives.





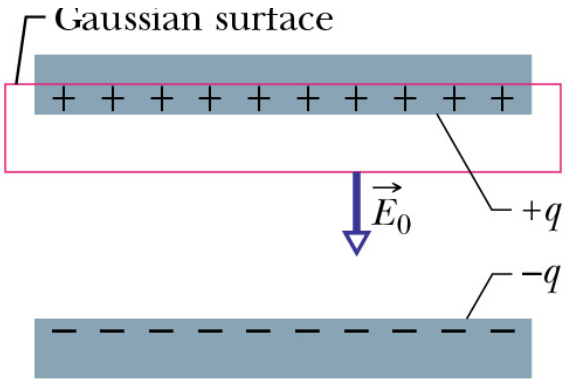
En conséquence, les diélectriques polaires et non polaires ont pour effet d'affaiblir tout champ électrique appliqué qui se trouve en eux.

La grandeur du moment dipolaire *p=q x d* d'un matériau détermine le champ électrique E', et donc le champ interne du diélectrique E.

Vous pouvez imaginer que les diélectriques sont des conducteurs avec une pauvre conductivité – car la mobilité des charges internes est limitée, le champ interne est donc réduit par la redistribution des charges, mais pas annulé.

Les diélectriques et le théorème de Gauss

La figure représente un condensateur plan dont les plaques possèdent une aire A et une charge q. L'espace entre les plaques est rempli d'air.



(a)

On obtient le champ électrique entre les plaques selon le théorème de Gauss:

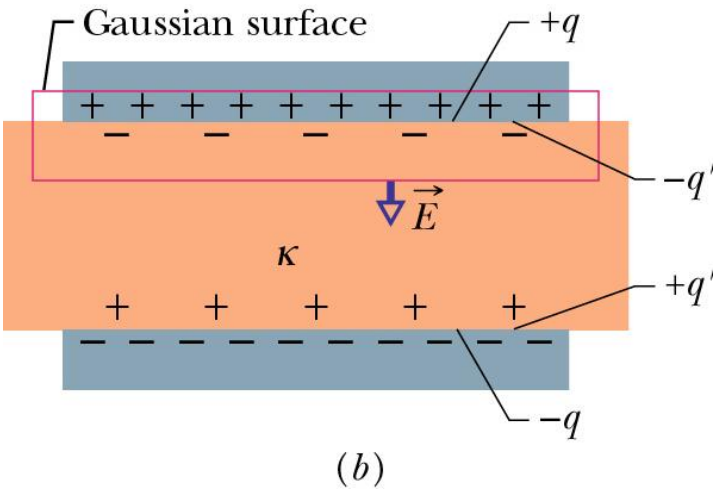
$$\oint_S \vec{E}_0 \cdot d\vec{A} = \frac{q_{\text{int}}}{\varepsilon_0}$$

$$E_0 A = \frac{q}{\varepsilon_0}$$

Et donc :

$$E_0 = \frac{q}{A\varepsilon_0}.$$

On remplit maintenant l'espace entre les plaques avec un diélectrique. La polarisation des molécules du diélectrique engendre une charge nette q' sur la surface du diélectrique.



On obtient le champ électrique entre les plaques selon le théorème de Gauss:

$$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{q_{\text{int}}}{\varepsilon_0}$$

$$EA = \frac{q - q'}{\varepsilon_0} \rightarrow E = \frac{q - q'}{A\varepsilon_0}.$$

Charge « libre » Charge « liée »

$$\frac{E_0}{E} = \frac{q}{q - q'}$$

$$= \kappa$$

Permittivité relative où constant diélectrique

Permittivité

$$\kappa = \frac{E_0}{E} = \frac{q}{q - q'}$$

κ exprime la grandeur de l'affaiblissement du champ électrique a cause d'un diélectrique.

$\kappa = 1 \longrightarrow$ vide

$\kappa > 1 \longrightarrow$ diélectrique

$$\frac{E_0}{E} = \kappa \qquad E_0 = \frac{q}{A\varepsilon_0} \longrightarrow E = \frac{q}{A\kappa\varepsilon_0} = \frac{q}{A\varepsilon}$$

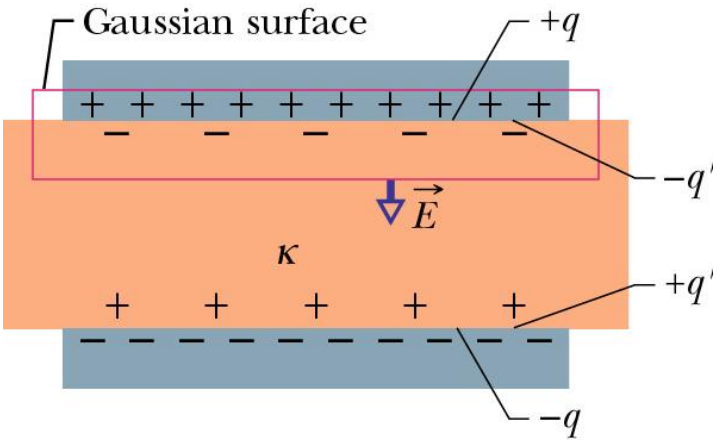
$\varepsilon = \kappa\varepsilon_0$ Permittivité

$\varepsilon = \varepsilon_0 \longrightarrow$ vide

$\varepsilon > \varepsilon_0 \longrightarrow$ diélectrique

Exemple: diélectrique dans un condensateur

Un condensateur plan a une capacité de 100 pF, l'aire de ses plaques est de 100 cm^2 et un mica diélectrique (k=5.4) remplit l'espace entre les plaques.



Si la différence de potentiel est de 50 V

Le module du champ électrique E présent dans le mica vaut :

champ électrique entre les plaques d'une condensateur plan:

$$E = \frac{q}{A\kappa\varepsilon_0}$$

Or la définition de la capacité est donné par:

$$C = \frac{q}{V}$$

Par conséquent :

$$E = \frac{q}{A\kappa\varepsilon_0} = \frac{CV}{A\kappa\varepsilon_0} = \frac{(100 \times 10^{-12})(50)}{(0.01)(5.4)(8.85 \times 10^{-12})}$$

$$= 10.5 \text{ kV/m}$$

La grandeur de la charge libre accumulée sur les plaques vaut :

$$q = CV = (100 \times 10^{-12})(50)$$

$$= 5 \text{ nC}$$

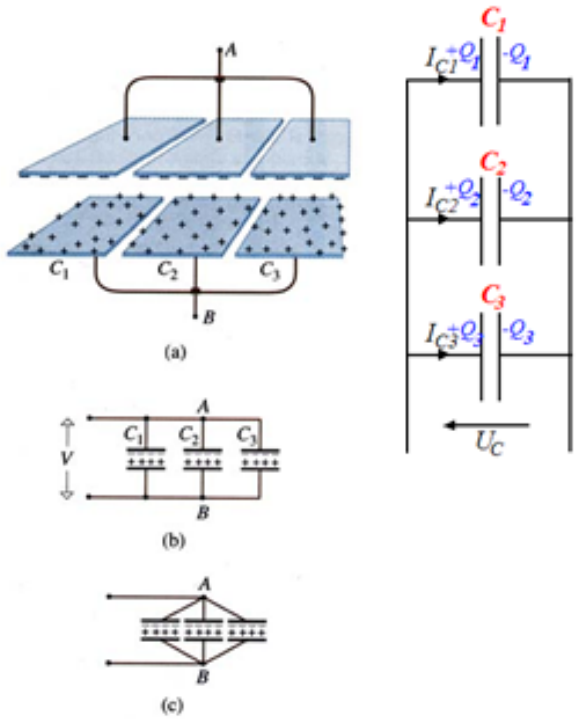
Et la grandeur de la charge liée sur la surface du mica vaut :

$$\kappa = \frac{q}{q - q'} \longrightarrow q' = q\left(1 - \frac{1}{\kappa}\right) = (5)(1 - \frac{1}{5.4})$$

$$= 4.1 \text{ nC}$$

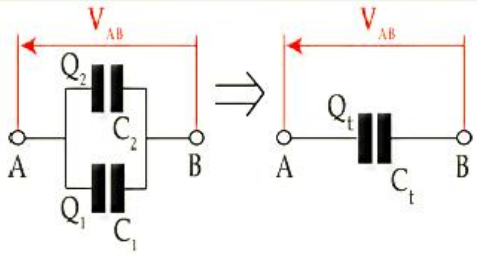
Association de capacités (condensateurs) en parallèle

Intéressons-nous à la mise en parallèle de plusieurs capacités :



La capacité C_{eq} équivalente à l'association en parallèle de N condensateurs de capacité $C_1, C_2, \ldots, C_N$ est égale à la somme des N capacités considérées :

$$C_{eq} = C_1 + C_2 + \ldots + C_N$$



$$Q = C\,V$$

$$Q_t = Q_1 + Q_2$$

$$C_t V_{AB} = C_1 V_{AB} + C_2 V_{AB}$$

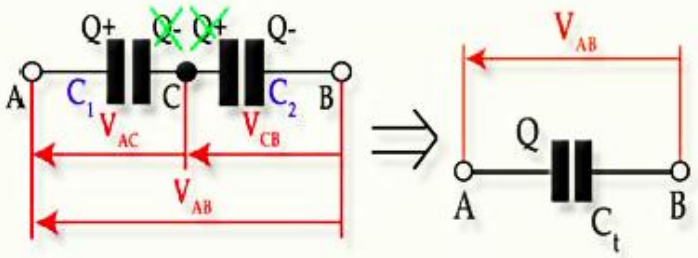
Donc :

$$\boxed{C_t = C_1 + C_2}$$

Si nous plaçons n condensateurs (C_i) en parallèle, la valeur du condensateur équivalent C_t est égale à la somme des valeurs des condensateurs C_i.

$$C_t = \sum_{i=1}^{i=n} C_i$$

Mise en série de condensateurs (capacités)



Nous savons que :

$$Q = C\,V$$

Or :

$$V_{AB} = V_{AC} + V_{CB}$$

Donc :

$$\frac{Q}{C_t} = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2}$$

$$Q = C\,V$$

$$V_{AB} = V_{AC} + V_{CB}$$

$$\frac{Q}{C_t} = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2}$$

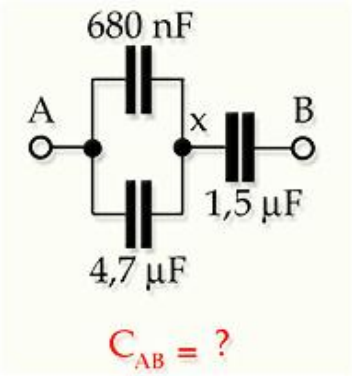
Donc :

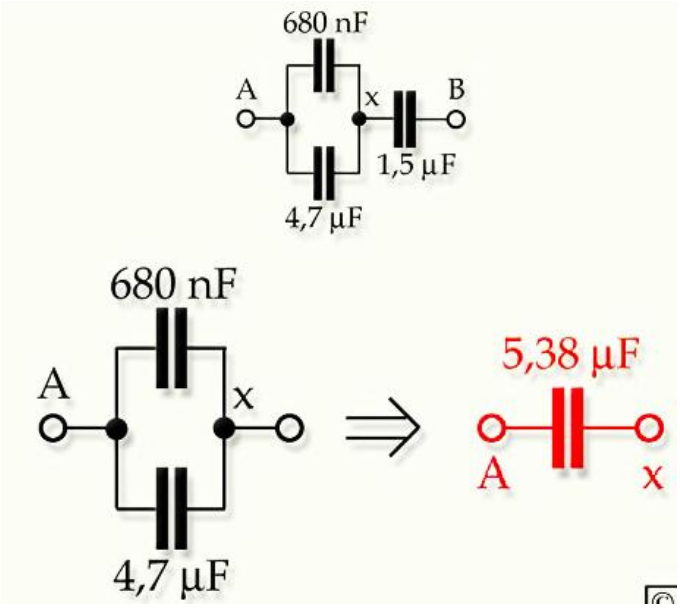
$$\boxed{\frac{1}{C_t} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}}$$

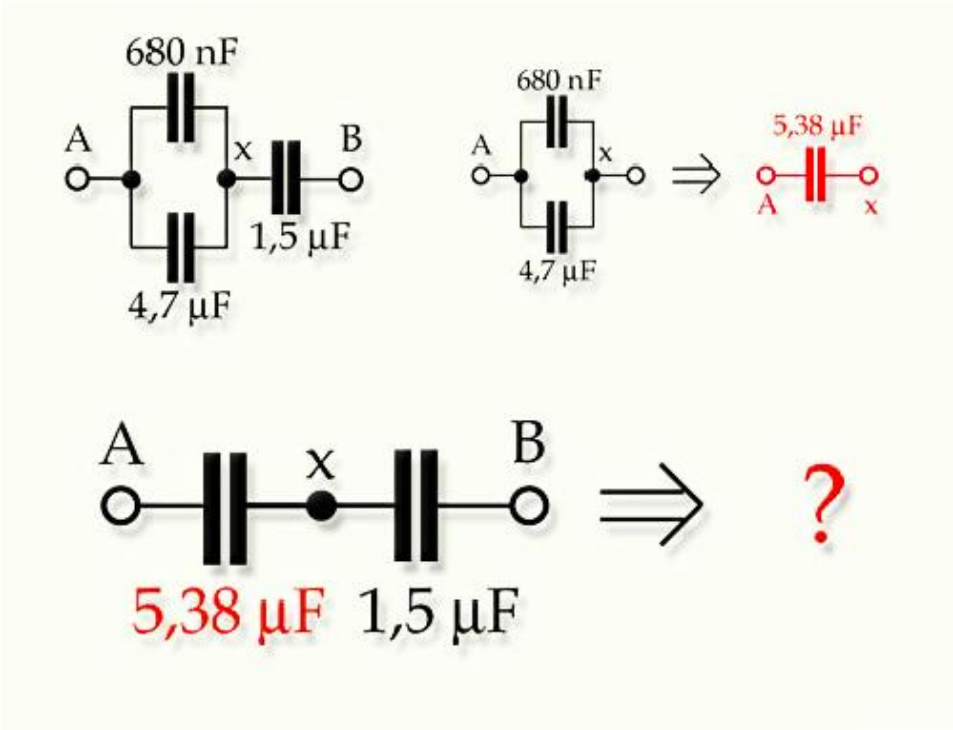
Si nous plaçons n condensateurs (C_i) en série, l'inverse de la valeur du condensateur équivalent C_t est égale à la somme des inverses des valeurs des condensateurs C_i.

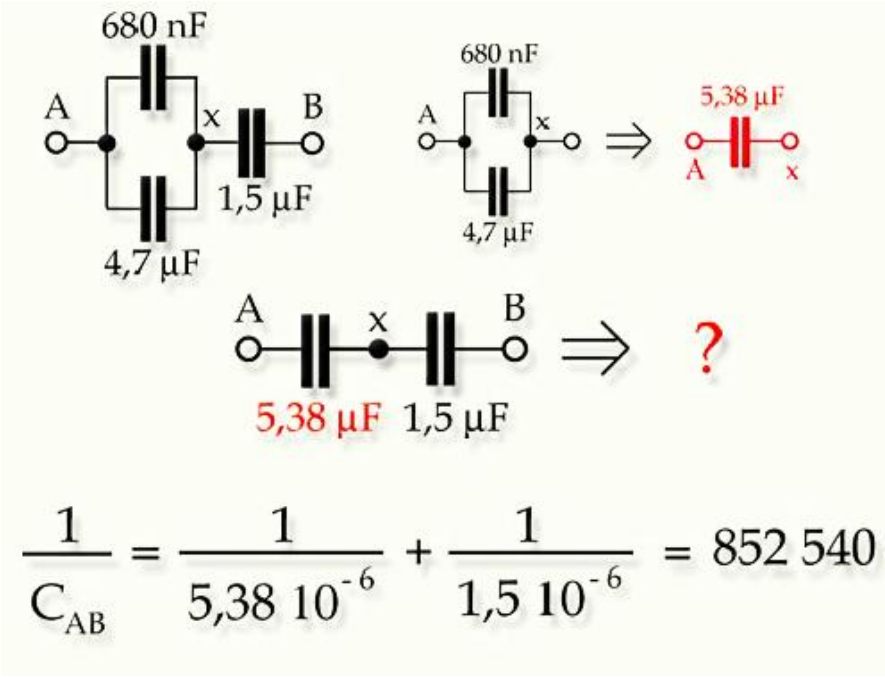
$$\frac{1}{C_t} = \sum_{i=1}^{i=n} \frac{1}{C_i}$$

Exercice :


680 nF
A
x
B
1,5 µF
4,7 µF
C_{AB} = ?


680 nF
A
x
B
1,5 µF
4,7 µF
680 nF
A
x
4,7 µF
5,38 µF
A
x

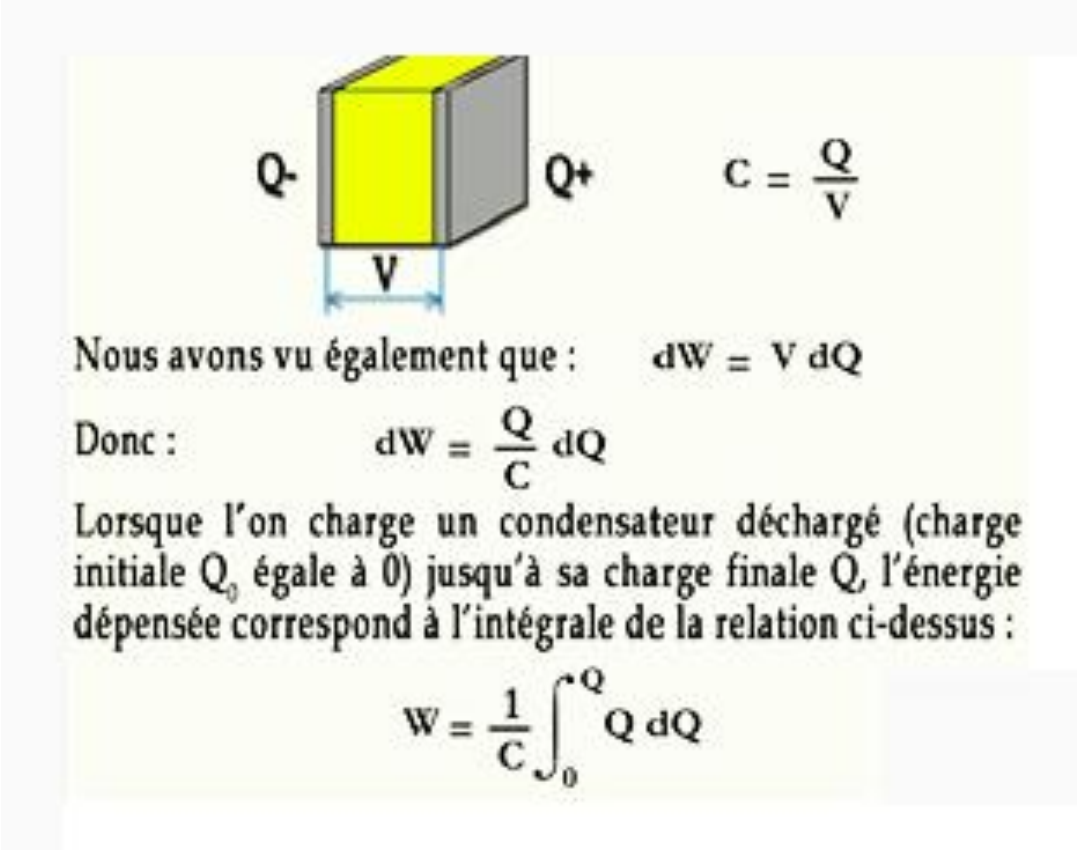

680 nF
A
x
B
1,5 µF
4,7 µF
680 nF
A
x
4,7 µF
5,38 µF
A
x
A
x
B
5,38 µF
1,5 µF
?

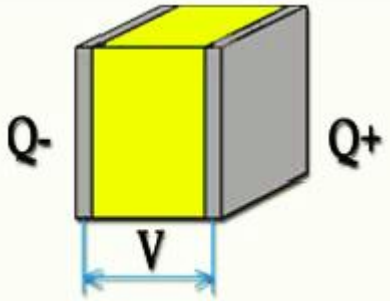


$$\frac{1}{C_{AB}} = \frac{1}{5{,}38\ 10^{-6}} + \frac{1}{1{,}5\ 10^{-6}} = 852\ 540$$

Energie stockée dans un condensateur

Nous avons vu que la capacité d'un condensateur vaut :





$$dW = \frac{Q}{C}\,dQ$$

$$W = \frac{1}{C}\int_0^Q Q\,dQ$$

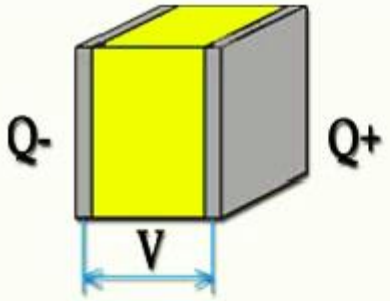
Or :

$$\int Q\,dQ = \left[\frac{Q^2}{2}\right]$$

Donc :

$$W = \frac{1}{C}\left[\frac{Q^2}{2}\right]_0^Q = \frac{1}{C}\left[\frac{Q^2}{2} - 0\right]$$

$$W = \frac{Q^2}{2C}$$



$$W = \frac{Q^2}{2C}$$

Or : $Q = C\,V$

On peut donc aussi écrire :

$$W = \frac{Q^2}{2C} = \frac{C^2V^2}{2C} = \frac{1}{2}\,CV^2$$

On a aussi que :

$$W = \frac{Q^2}{2C} = \frac{QCV}{2C} = \frac{1}{2}\,QV$$

Donc :

$$W = \frac{1}{2}\,\frac{Q^2}{C} = \frac{1}{2}\,CV^2 = \frac{1}{2}\,QV$$

Exercice :

Un flash d'appareil photo comporte trois condensateurs de 4700 microFarad montés en parallèle qui sont chargés sous une tension de 3V.

Quelle est l'énergie accumulée?

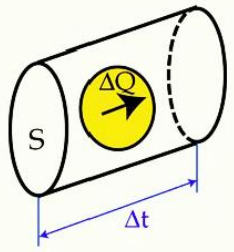
Quelle est la charge électrique accumulée?

Si la décharge est réalisée en 1ms, calculez l'intensité du courant de décharge?

Quelle est la puissance de l'éclair?

ELECTROCINETIQUE

Le courant électrique



Le courant électrique est le débit de charge dans un conducteur. Considérons une section cylindrique d'un fil conducteur de section S. Si une charge ΔQ traverse cette surface en un temps Δt, le courant moyen vaut :

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$$

Le courant instantané vaut donc :

$$i(t) = \frac{dQ}{dt}$$

Donc :

$$dQ = i(t)\,dt$$

Donc d'une manière générale :

$$q(t) = \int_{t_1}^{t_2} i(t)\,dt$$

$$i(t) = \frac{dQ}{dt}$$

L'unité SI pour l'intensité du courant électrique est l'ampère. Un ampère vaut donc un coulomb par seconde :

$$[A] = \frac{[C]}{[s]}$$

Donc :

$$[C] = [A.s]$$

Or :

$$1\ Ah = 1\ A\ .\ 3600\ s$$
$$1\ Ah = 3600\ A.s$$

D'où :

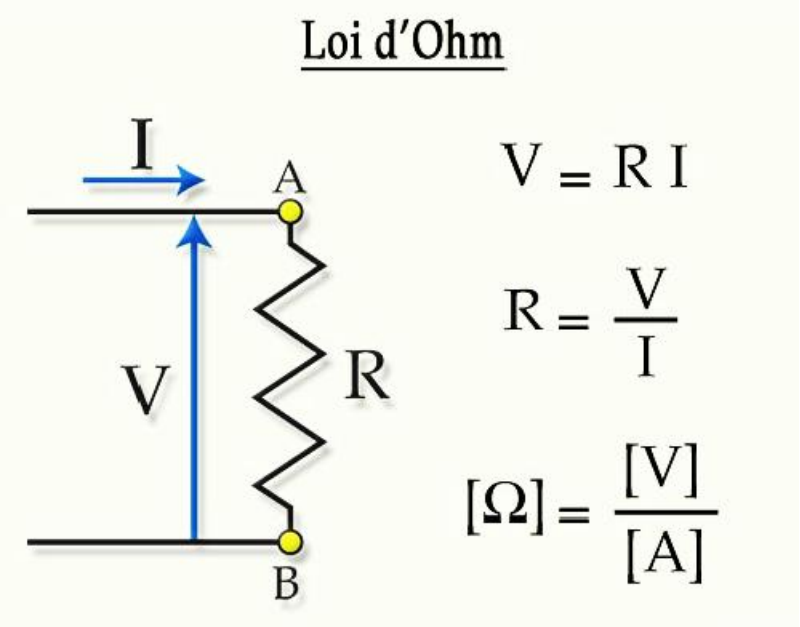
$$1\ Ah = 3600\ C$$

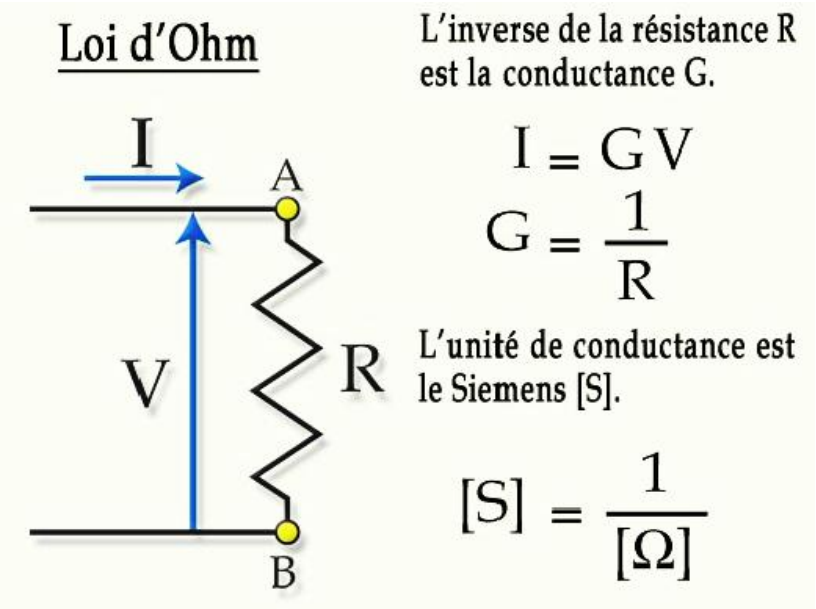
© J.Panneel HEFF

Les résistances

La loi d'Ohm

Lien entre courant et tension aux bornes d'une résistance :

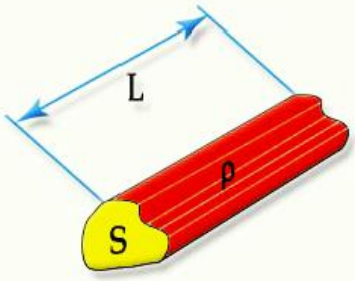




La loi de Pouillet

Résistance électrique d'un matériau :

Loi de Pouillet



$$R = \rho \frac{L}{S}$$

ρ : résistivité

$$G = \frac{1}{R}$$

$$G = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{S}{L}$$

L'inverse de la résistivité (ρ) est la conductivité (σ).

$$\sigma = \frac{1}{\rho}$$

Variation de la résistivité avec la température

La résistivité dépend de la température, donc la résistance également. Si la résistance augmente, on parle de résistance à coefficient de température positif. C'est le cas de la plupart des métaux. Par contre, si la résistance diminue, on parle de résistance à coefficient de température négatif. C'est le cas du carbone. On définit cette variation par les équations suivantes :

$$\rho_T = \rho_0 (1 + \alpha T)$$

α est appelé le premier coefficient de température, T étant la température.

$$\rho_T = \rho_0 (1 + \alpha T)$$

Pour les résistance de précision, on définit également un deuxième coefficient de température β, parfois même un troisième γ.

$$\rho_T = \rho_0 (1 + \alpha T + \beta T^2)$$

$$\rho_T = \rho_0 (1 + \alpha T + \beta T^2 + \gamma T^3)$$

Résistivité de quelques matériaux :

Substance	ρ à 20 °C en nΩm
Argent	16,5
Cuivre électrolytique recuit	17,5
Cuivre (fil étiré à froid)	17,9
Or	22
Aluminium doux	28
Aluminium étiré	29
Constantan (60% Cu, 40% Ni)	49
Constantan (54% Cu, 45% Ni, 1% Mn)	50
Bronze phosphoreux	83
Bronze aluminium	144
Bronze (88% Cu, 12% Sn)	193
Bronze (80 % Cu, 20% Sn)	220
Etain	140
Nickel	134,2

Substance	ρ à 20 °C en nΩm
Laiton fondu	71
Laiton laminé (66% Cu, 34% Zn)	57
Maillechort (60% Cu, 25% Zn, 15% Ni)	402
Chrome	28
Filament de carbone	640
Antimoine	352
Cadmium	70
Mercure	960
Palladium	110
Platine	98
Plomb	208
Rhodium	50
Tungstène	59
Zinc	62

Exercice :

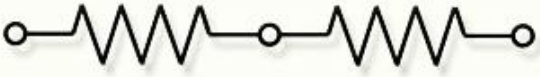
Fil cuivre ($\rho = 1,6\ 10^{-8}$, $a = 4 \times 10^{-3}$) possède une section de $2,5mm^2$ et une longueur de 100m.

Que vaut sa résistance?

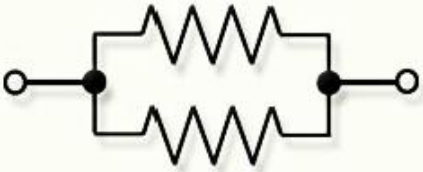
Association des résistances

On peut associer des résistances, soit en série, soit en parallèle.

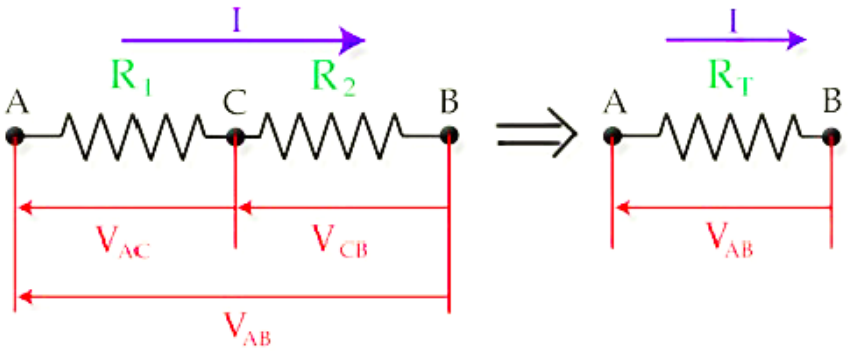
Montage en série :



Montage en parallèle :



Calculons la valeur de la résistance équivalente R_T correspondant à l'association de deux résistances en série R_1 et R_2. Placé en série, la résistance R_1 est traversée par le même courant I que la résistance R_2. La résistance R_T est également traversée par le courant I.



Nous savons que :

$$V = R\,I$$

Or :

$$V_{AB} = V_{AC} + V_{CB}$$

Donc :

$$R_T I = R_1 I + R_2 I$$

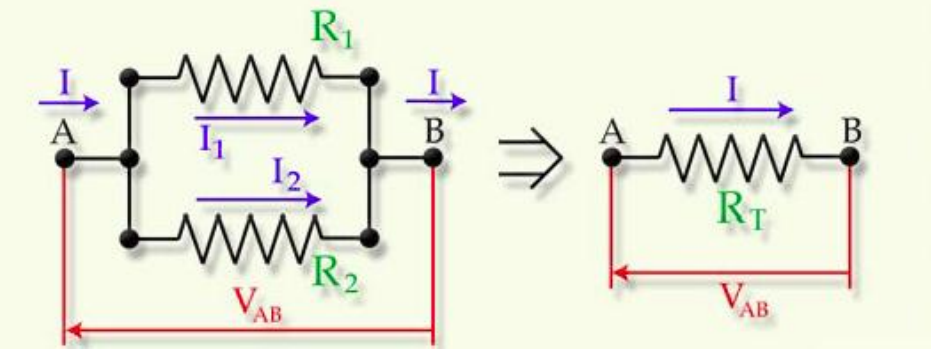
$$\boxed{R_T = R_1 + R_2}$$

Si nous plaçons n résistances (R_i) en série, la valeur de la résistance équivalente R_T est égale à la somme des valeurs des résistances R_i.

$$R_T = \sum_{i=1}^{i=n} R_i$$

Résistances en parallèle

Calculons la valeur de la résistance équivalente R_T correspondant à l'association de deux résistances en parallèle R_1 et R_2. Placé en parallèle, la résistance R_1 a, à ses bornes, la même différence de potentiel V_{AB} que la résistance R_2. La résistance R_T a, à ses bornes, la même différence de potentiel V_{AB}.



Nous savons que :

$$I = I_1 + I_2$$

Or :

$$I = \frac{V}{R}$$

Donc :

$$\frac{V_{AB}}{R_T} = \frac{V_{AB}}{R_1} + \frac{V_{AB}}{R_2}$$

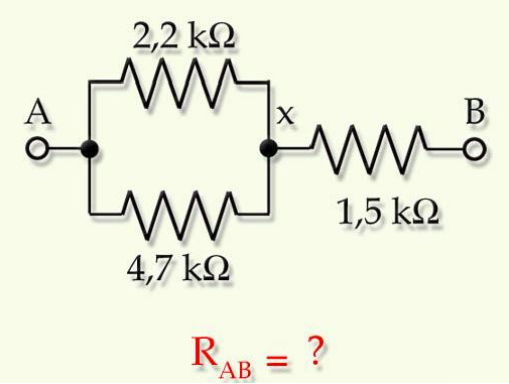
Donc :

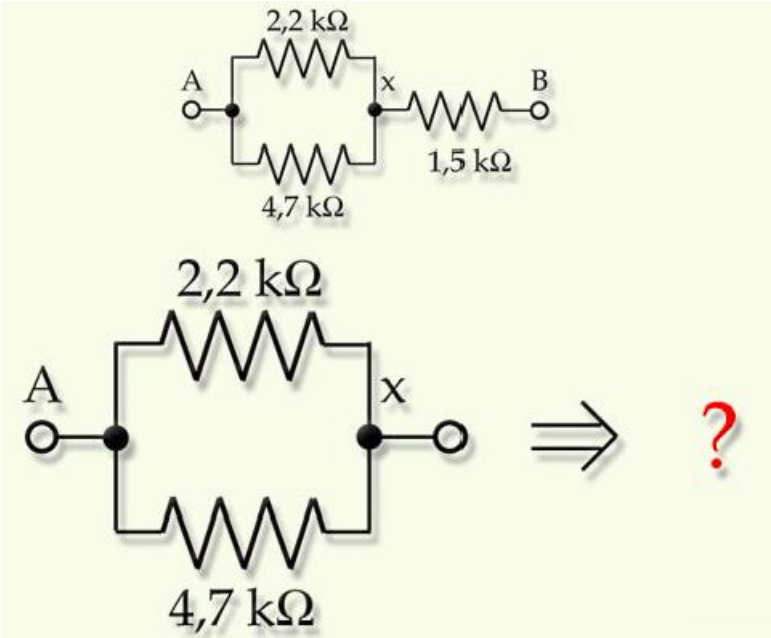
$$\boxed{\frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}}$$

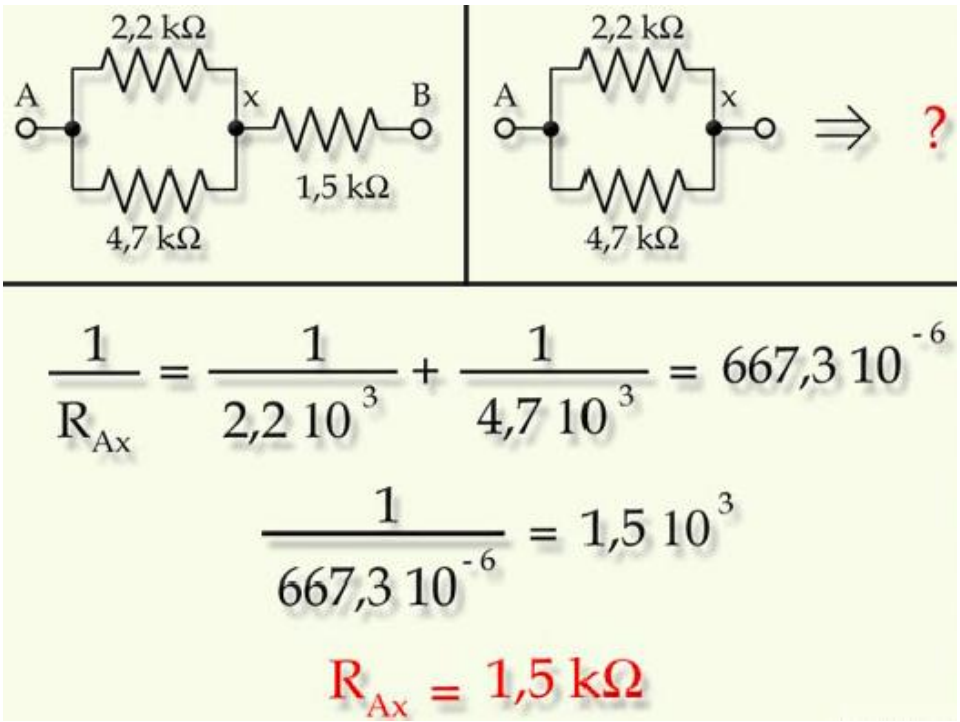
Si nous plaçons n résistances (R_i) en parallèle, l'inverse de la valeur de la résistance équivalente R_T est égale à la somme des inverses des valeurs des résistances R_i.

$$\frac{1}{R_T} = \sum_{i=1}^{i=n} \frac{1}{R_i}$$

Exercice :



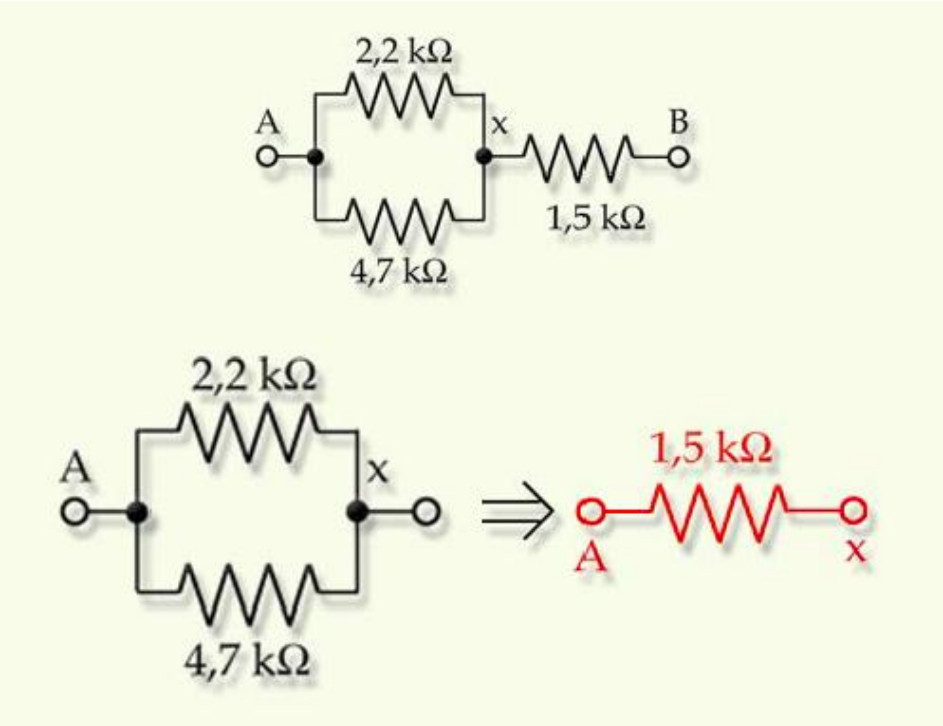


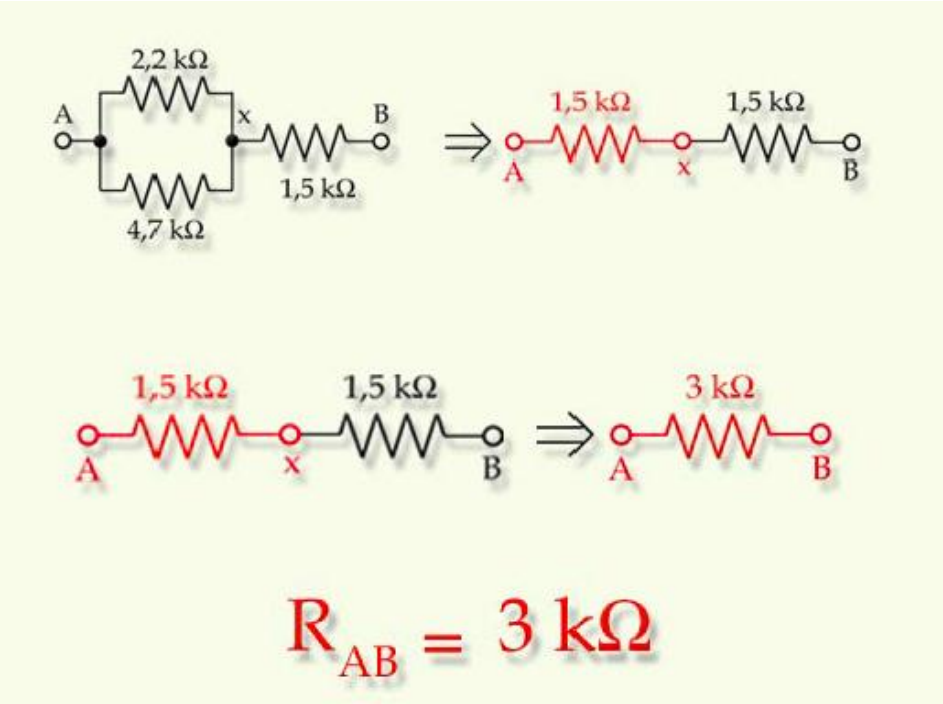


$$\frac{1}{R_{Ax}} = \frac{1}{2{,}2\ 10^{3}} + \frac{1}{4{,}7\ 10^{3}} = 667{,}3\ 10^{-6}$$

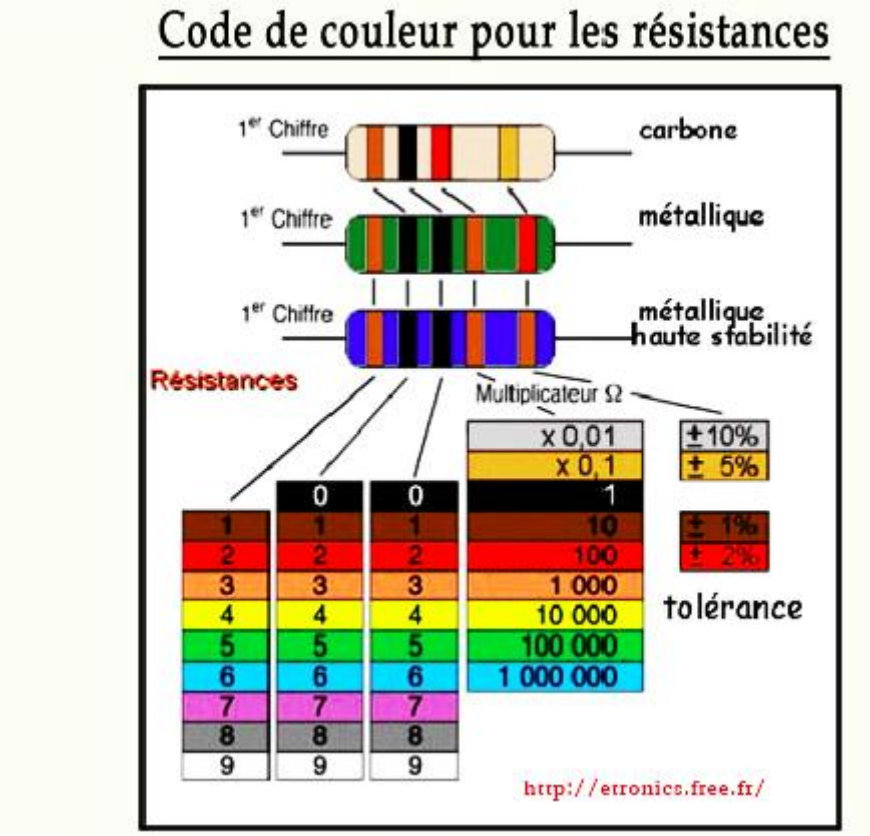
$$\frac{1}{667{,}3\ 10^{-6}} = 1{,}5\ 10^{3}$$

$$R_{Ax} = 1{,}5\ k\Omega$$

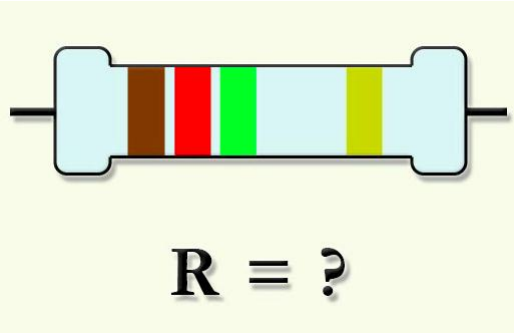

2,2 kΩ
A
x
B
1,5 kΩ
4,7 kΩ
2,2 kΩ
A
x
1,5 kΩ
A
x
4,7 kΩ

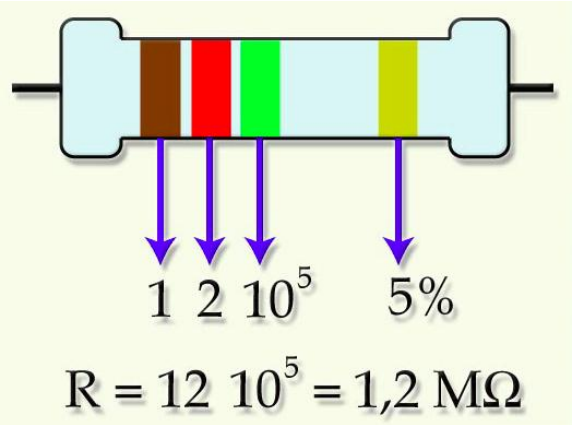

2,2 kΩ
A
x
B
1,5 kΩ
4,7 kΩ
1,5 kΩ
1,5 kΩ
A
x
B
1,5 kΩ
1,5 kΩ
A
x
B
3 kΩ
A
B
$R_{AB} = 3\ k\Omega$

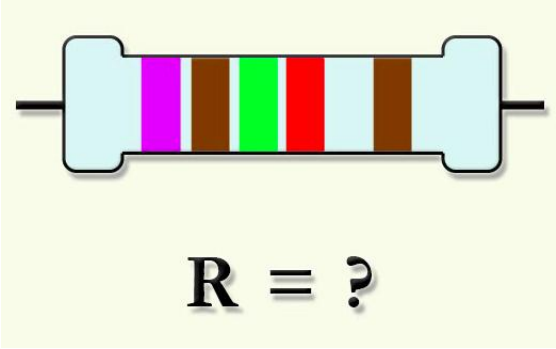
Marquage des résistances

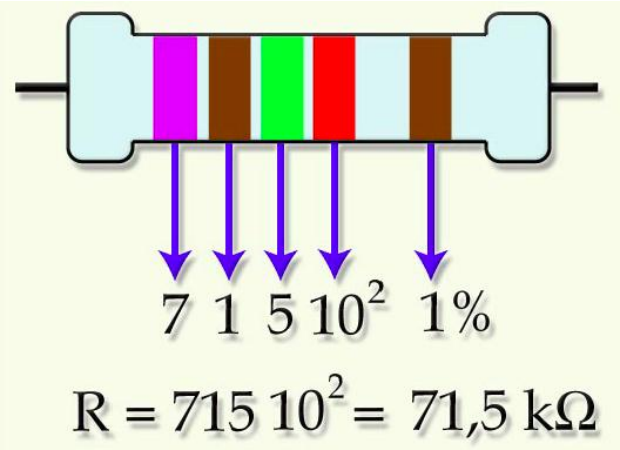


Exercice :







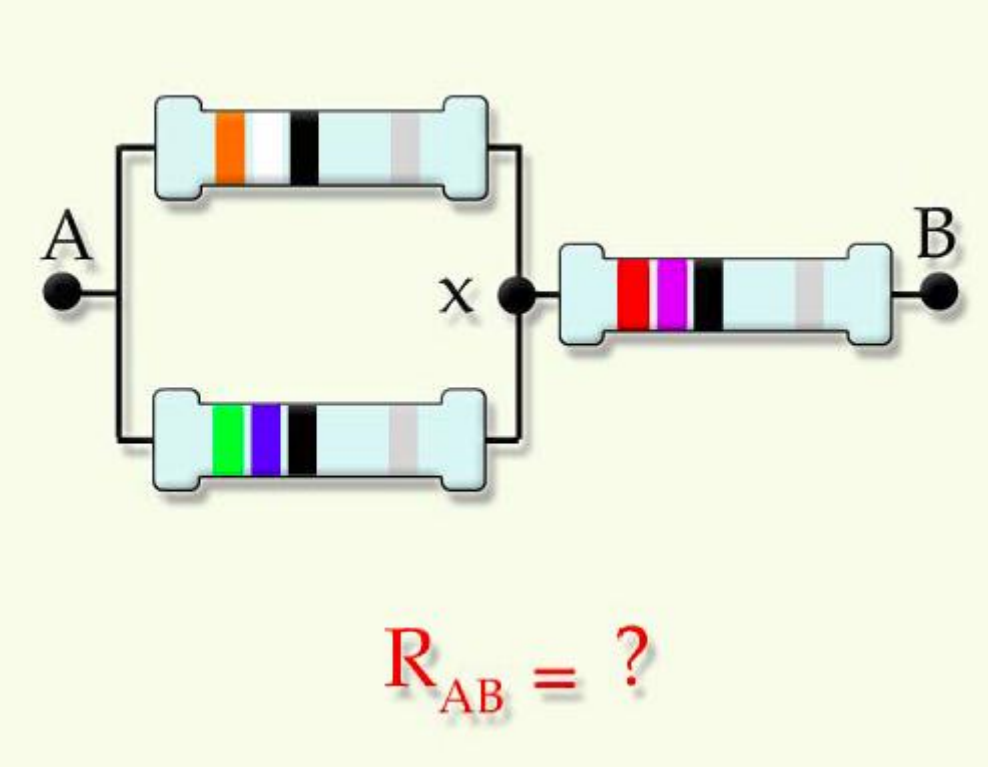


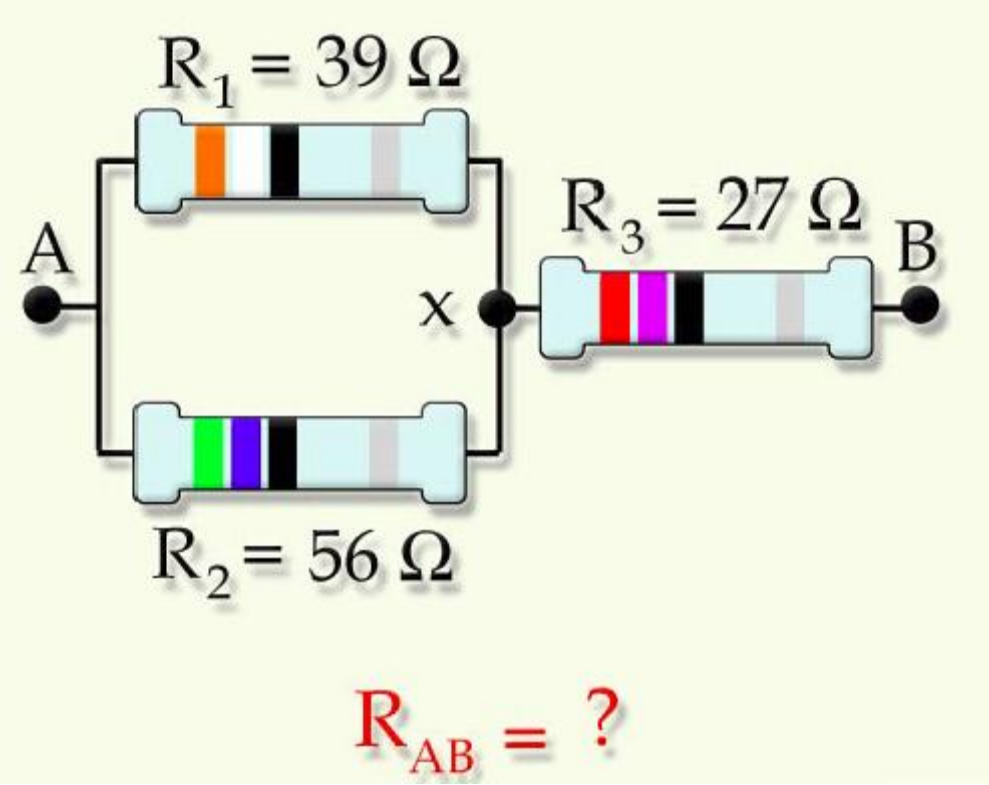
Valeurs normalisées

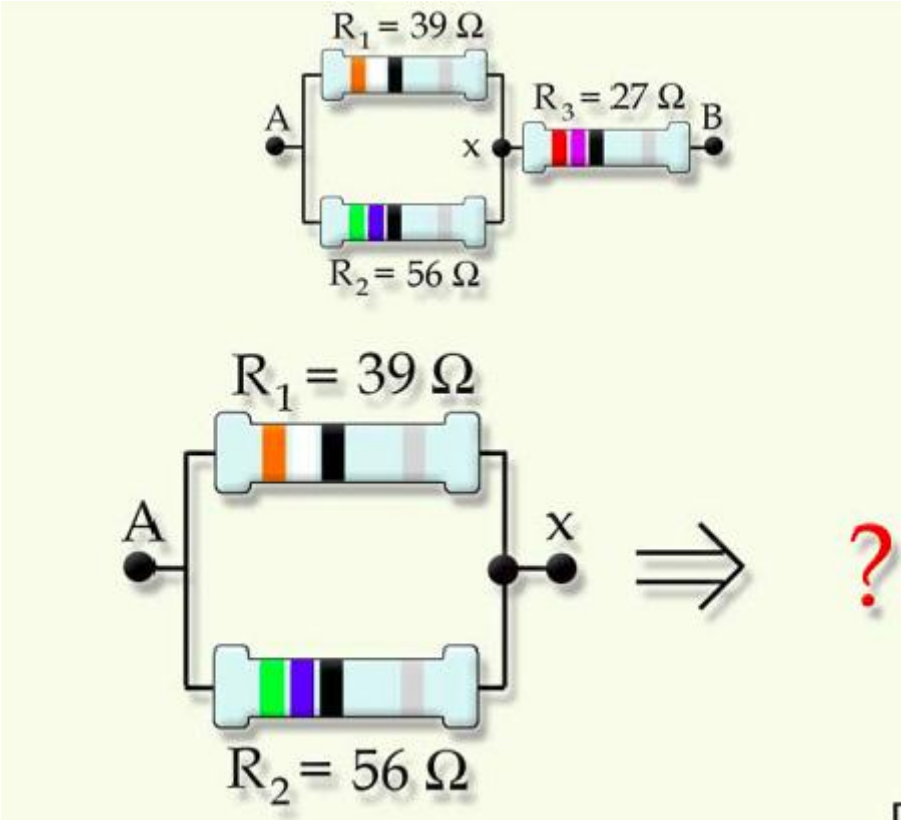
E3	E6	E12	E24	E96	E96	E96	E96	E96	E96	E96	E96	E96
10	10	10	10	100	200	301	402	511	604	715	806	909
			11	102	205	309	412	523	619	732	825	931
		12	12	105	210	316	422	536	634	750	845	953
			13	107	215	324	432	549	649	768	866	976
	15	15	15	110	221	332	442	562	665	787	887	
			16	113	226	340	453	576	681			
		18	18	115	226	348	464	590	698			
			20	118	232	357	475					
22	22	22	22	121	237	365	487					
			24	124	243	374	499					
		27	27	127	249	383						
			30	120	255	392						
	33	33	33	133	261							
			36	137	267							
		39	39	140	274							
			43	143	280							
47	47	47	47	147	287							
			51	150	294							
		56	56	154								
			62	158								
	68	68	68	162								
			75	165								
		82	82	169								
			91	174								
				178								
				182								
				187								
				191								
				196								

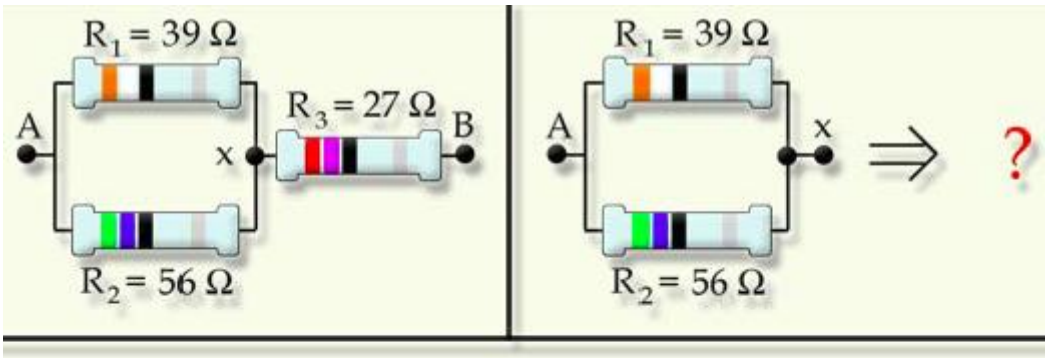
http://etronics.free.fr/

©


A
x
B
R_{AB} = ?


R_1 = 39 Ω
A
x
R_3 = 27 Ω
B
R_2 = 56 Ω
R_{AB} = ?

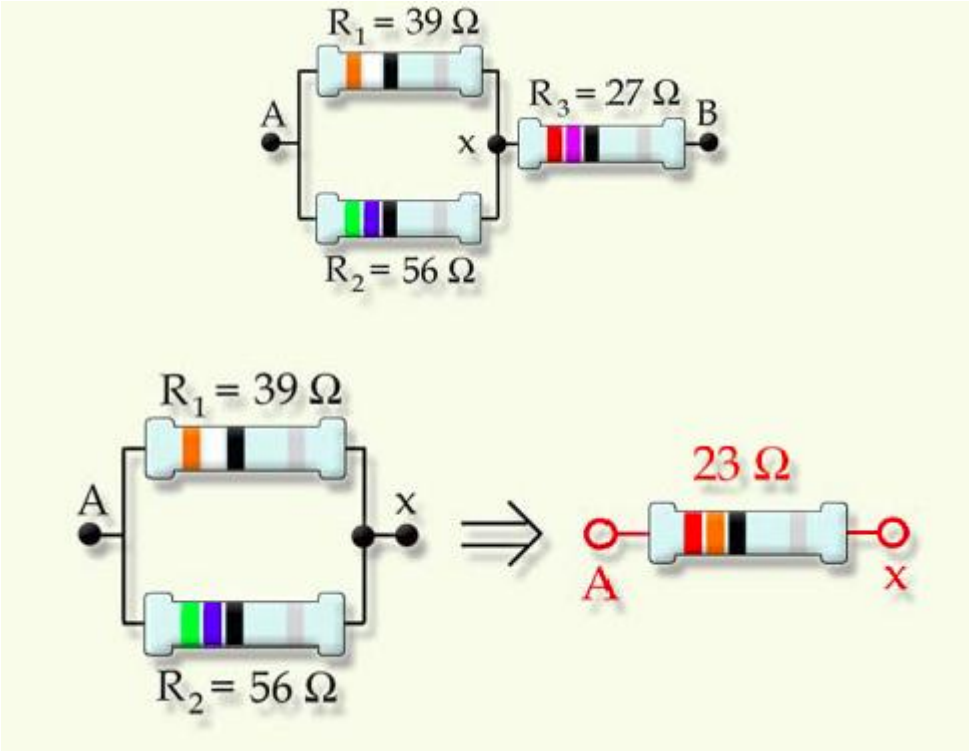


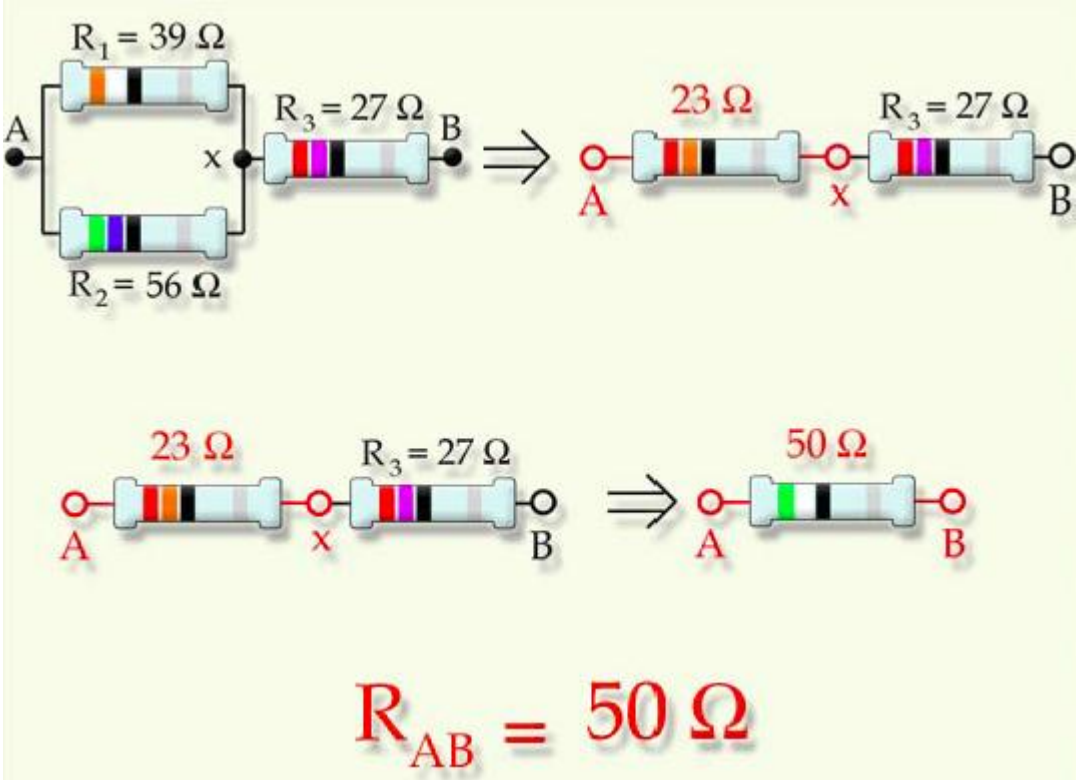


$$\frac{1}{R_{Ax}} = \frac{1}{39} + \frac{1}{56} = 43{,}5\ 10^{-3}$$

$$\frac{1}{43{,}5\ 10^{-3}} = 23$$

$$R_{Ax} = 23\ \Omega$$


R1 = 39 Ω
R3 = 27 Ω
A
B
x
R2 = 56 Ω
R1 = 39 Ω
A
x
R2 = 56 Ω
23 Ω
A
x


R1 = 39 Ω
R3 = 27 Ω
A
B
x
R2 = 56 Ω
23 Ω
R3 = 27 Ω
A
x
B
23 Ω
R3 = 27 Ω
A
x
B
50 Ω
A
B
RAB = 50 Ω

Caractéristiques des résistances :

a) la résistance nominale,
b) la tolérance,
c) le coefficient de tension,
d) la puissance nominale,
e) la tension maximale aux bornes,
f) la stabilité,
g) la tension de bruit.

La **résistance nominale** est la valeur portée sur le corps de la résistance.

La **tolérance** est un pourcentage, en plus ou en moins autour de la valeur nominale, que le fabricant s'engage à respecter pour toutes les pièces livrées.

Le **coefficient de tension** est la mesure de la variation de la valeur de la résistance en fonction de la tension à ses bornes. Elle s'exprime en pourcentage de variation par volt. Ce coefficient est très faible pour les résistances bobinées et les résistances à couches métalliques. Il est appréciable pour les résistances agglomérées (0,02 %/V).

La **puissance nominale** est la puissance que peut dissiper la résistance en air calme à la pression atmosphérique normale standard et pour une température ambiante spécifiée par le fabricant. Cette température est généralement comprise entre 20 °C et 70 °C)

La **tension maximale** aux bornes E est donnée par la formule :

$$E = \sqrt{P\,R}$$

E : tension maximale aux bornes,
P : puissance nominale,
R : valeur de la résistance.

La stabilité : on dit qu'une résistance est stable lorsque, après un long usage, sa valeur reste proche de sa valeur nominale. Les résistances bobinées et à films métalliques sont très stables. Les résistances agglomérées le sont moins.

La tension de bruit est une tension parasite produite par l'agitation thermique des atomes. Elle est faible pour les résistances bobinées et à films métalliques. Elle est plus importante pour les résistances agglomérées. Elle se mesure en microvolts par volts appliqués aux bornes de la résistance.

Types de résistances

Résistances fixes :

a) résistances bobinées de puissance,
b) résistances bobinées de précision,
c) résistances à couches,
d) résistances agglomérées.

Résistances variables bobinées :

a) résistances à faible dissipation,
b) résistances à forte dissipation,
c) résistances de précision.

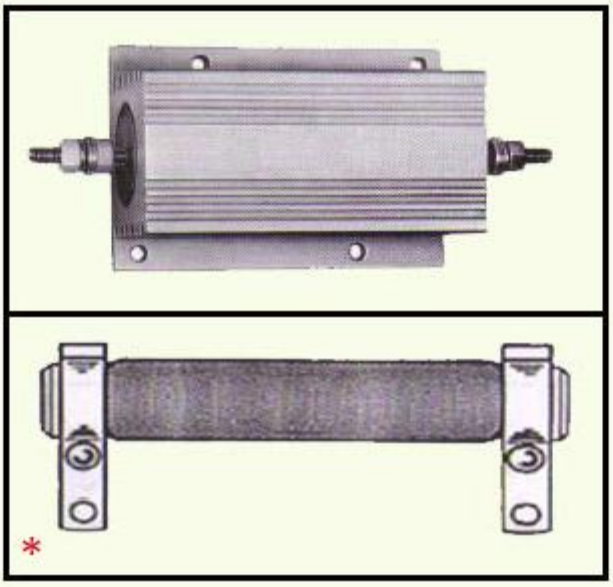
Résistances variables non bobinées :

a) résistances à couche de carbone,
b) résistances à pistes moulées,
c) résistances à piste Vermet ou Cermet,
d) résistances à plastique conducteur,
e) résistances à couches métalliques.

Résistances bobinées de puissance

Les résistances bobinées sont composées d'un support, d'un fil bobiné et d'une protection. Les sorties se font par fil pour les faibles puissances, par bague ou par collier pour les puissances élevées.
Le support est constitué par un corps isolant tenant aux températures élevées. Il peut être en porcelaine, en stéatite, en alumine agglomérée ou en oxyde de béryllium aggloméré. Le fil peut être en nickel-chrome ou en nickel-cuivre.
Ces résistances peuvent être munies d'un dissipateur de chaleur en aluminium.

Résistances bobinées de puissance



* : http//www.scr.fr/

Résistances bobinées de précision

Les résistances bobinées de précision sont utilisées lorsque l'on veut une précision supérieure à 1 %, une stabilité absolue et une absence totale de bruit de fond. Elles sont généralement fort chères. Le fil est constitué d'alliages spéciaux (Karma ou Evanohm pour les résistances supérieures à 500 Ω, Manganin ou Constantan pour les résistances inférieures à 500Ω). Le support peut être en stéatite ou en plastique. Les résistances devant fonctionner en alternatif ou en sous impulsions doivent présenter un coefficient de self-induction pratiquement nul.

Résistances bobinées de précision

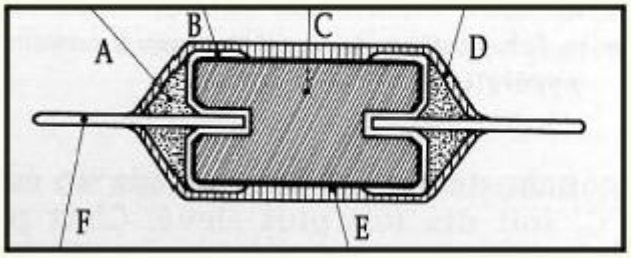
Karma est un alliage de nickel, de chrome, de cuivre et de fer (exemple : 74 % Ni, 20 % Cr, 3 % Cu, 3 % Fe).
Evanohm est un alliage de nickel, de chrome, d'aluminium et de cuivre (exemple : 75 % Ni, 20% Cr, 2,5 % Al, 2,5 % Cu) .
Mangamin est un alliage de cuivre, de manganèse et de nickel (exemple : 84 % Cu, 12 % Mn, 4 % Ni).
Constantan est un alliage de nickel, de cuivre et de manganèse qui a la particularité de garder une résistivité constante dans une large gamme de température (exemple : 44 % Ni, 54,8 % Cu, 1,2 % Mn).

Résistances à couches

On distingue les résistances :

a) à couches de carbone,
b) à couches métalliques,
c) à film photogravé,
d) à couches épaisses.

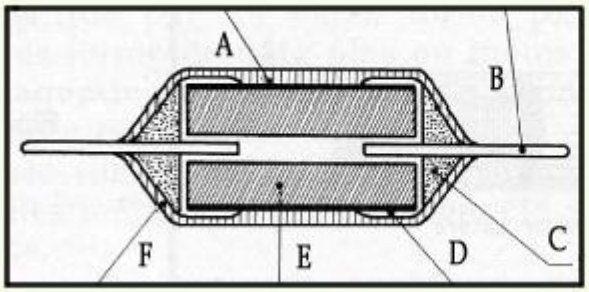
Résistances à couches de carbone



A : soudure
B : métallisation
C : tronçon céramique
D : enrobage multicouche
E : couches de carbone
F : connexion

Ces résistances peuvent être d'usage courant ou à haute stabilité. La différence entre les deux types tient à la précision des machines de fabrication, à la pureté des produits utilisés et à la multiplication des contrôles de qualités.

Résistances à couches métalliques

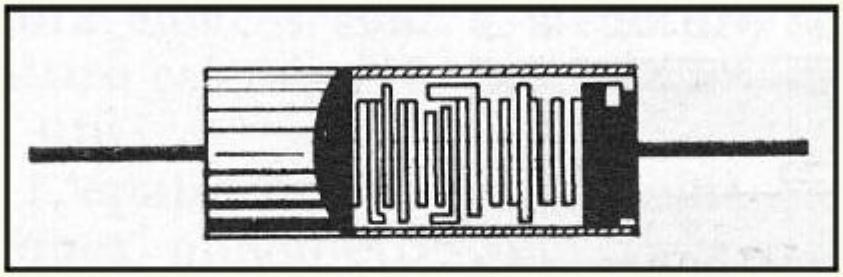


A : couche métallique
B : connexion
C : soudure
D : métallisation
E : tronçon céramique
F : enrobage multicouche

Les couches métalliques sont très minces. On utilise soit des métaux précieux, (Au, Pt, Rh, Pd), soit des métaux réfractaires (Mo, W, Ta, Nb), soit des métaux peu oxydables (Cr, Ni). Ces résistances sont plus performantes que les résistances à couches de carbone.

© J.Panne HEF

Résistances à film photogravé



Les résistances à film photogravé donnent des résistances de très haute précision et de très bonne stabilité.

Résistances à couches épaisses

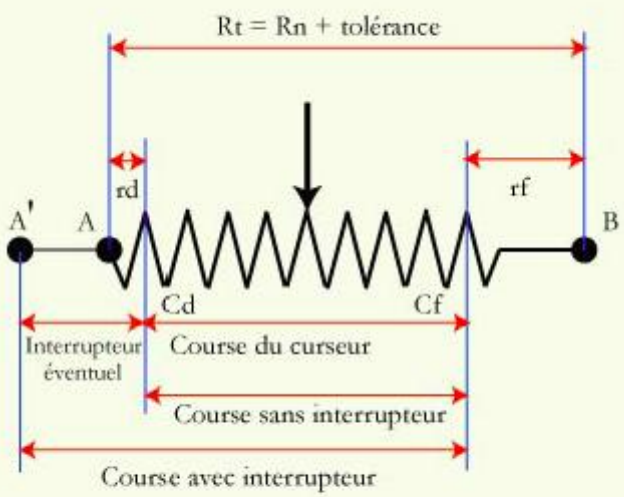
* : http//www.jecotec.ch/

Les résistances à couches épaisses donnent des résistances de très haute précision et de très bonne stabilité.

Résistances variables

* : http//electronics.free.fr/
** : http//www.dietrichundblum.ch/
*** : http//www.jpbellec.com/

Paramètres d'une résistance variable



Rn : résistance nominale
Rt : résistance total
rd : résistance résiduelle de début de course
rt : résistance résiduelle de fin de course
A : borne de début de course sans interrupteur
A' : borne de début de course avec interrupteur
B : borne de fin de course
Cd : curseur au début de course
Ct : curseur de fin de course

Pn : puissance nominale
Un : tension nominale
Tn : température nominale de service (température ambiante à laquelle est définie la dissipation limite nominale)

Pertes par effet Joule

Nous savons que $P = \frac{W}{t}$

mais $W = QV$

or $Q = I\,t$

donc $W = V\,I\,t$

d'où $P = V\,I$

Ceci est la formulation générale de la loi de Joule.

Dans le cas d'une résistance (élément qui suit la loi d'Ohm) et que le courant est continu, la loi de Joule peut s'exprimer comme suit :

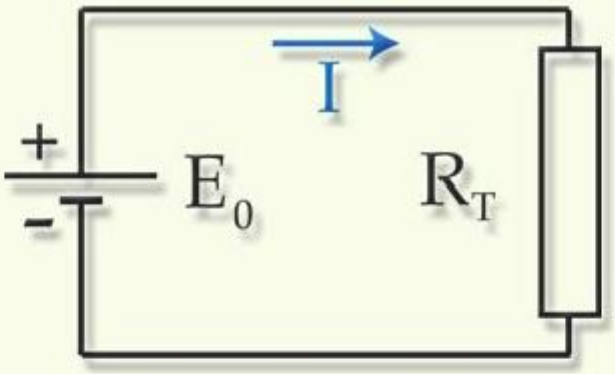
comme $$P = V\,I$$

et que $$V = R\,I$$

on obtient $$P = R\,I^2$$

ou bien $$P = \frac{V^2}{R}$$

Force électro-motrice



Considérons un circuit électrique fermé constitué d'une résistance et d'un générateur à courant continu constitué soit d'une pile, soit d'un accumulateur. Soit I le courant circulant dans ce circuit et R_T la résistance totale du circuit dont la conductivité moyenne vaut σ. En tout point du circuit, la loi locale d'Ohm donne :

$$\overline{J} = \sigma \, \overline{E}$$

où E est le champ électrique total en tout point.

© J.Panneels HEFF

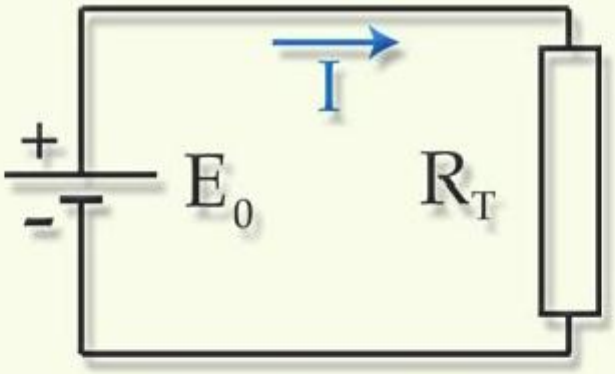
Dans le cas d'une résistance (élément qui suit la loi d'Ohm) et que le courant est continu, la loi de Joule peut s'exprimer comme suit :

comme $$P = V\,I$$

et que $$V = R\,I$$

on obtient $$P = R\,I^2$$

ou bien $$P = \frac{V^2}{R}$$

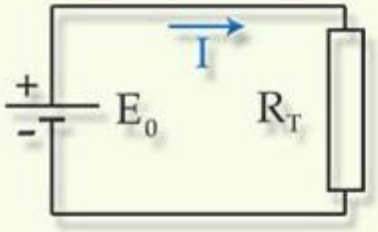


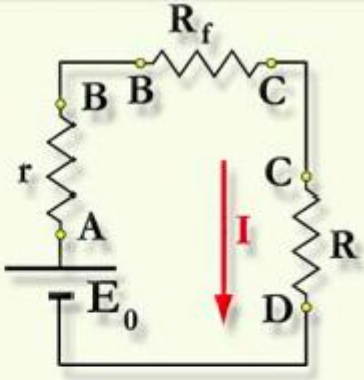
Considérons un circuit électrique fermé constitué d'une résistance et d'un générateur à courant continu constitué soit d'une pile, soit d'un accumulateur. Soit I le courant circulant dans ce circuit et R_T la résistance totale du circuit dont la conductivité moyenne vaut σ. En tout point du circuit, la loi locale d'Ohm donne :

$$\bar{J} = \sigma \bar{E}$$

où E est le champ électrique total en tout point.

© J.Panneels HEFF





$$\Sigma E_{0_i} = \Sigma V_i$$

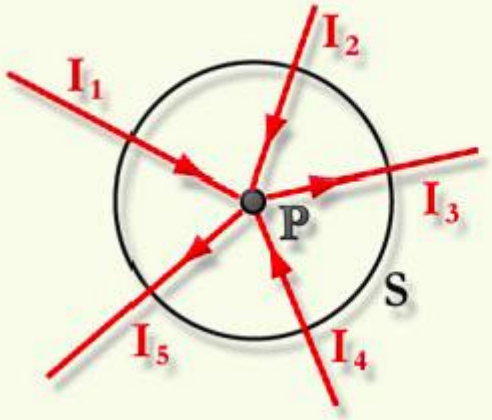
Nous pouvons exprimer cette relation par la phrase suivante :
« dans un circuit fermé (une boucle ou une maille) la somme des forces électromotrices est égale à la somme des chutes de tensions dans les résistances »

Il s'agit de la traduction de la loi de Kirchhoff des mailles.

Gustav Kirchhoff
(1824-1887)

*: http//www.nndb.com/

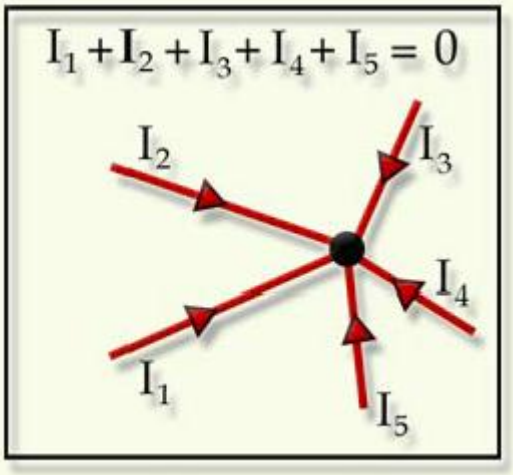
© J.Panneels HEFF



$$I_1 + I_2 - I_3 + I_4 - I_5 = 0$$

En fait, la relation reste la même si nous considérons qu'un courant sortant de la surface est un courant entrant négativement.
Nous pouvons donc dire :
« la somme algébrique des courants en un nœud d'un circuit est nulle »
Ceci constitue la seconde loi de Kirchhoff.
On l'appelle la loi des nœuds.

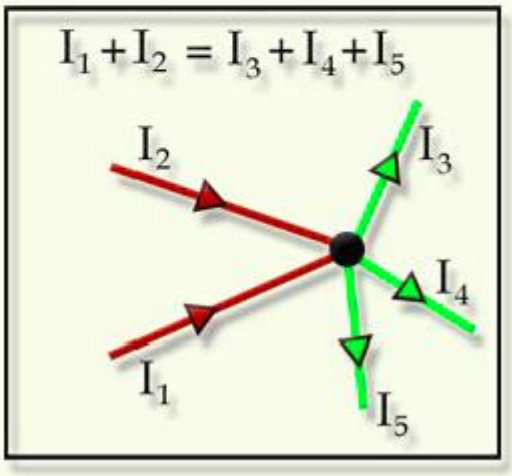
La loi des nœuds peut aussi s'énoncer de la façon suivante : la somme algébrique des courants entrant dans un nœud est nulle, sachant qu'un courant sortant est un courant entrant négativement.



$$\sum_{i=1}^{i=n} I_i = 0$$

© J.Panneel HEFF

D'après la loi des nœuds de Kirchhoff, la somme des courants entrant dans un nœud est égale à la somme des courants sortant.



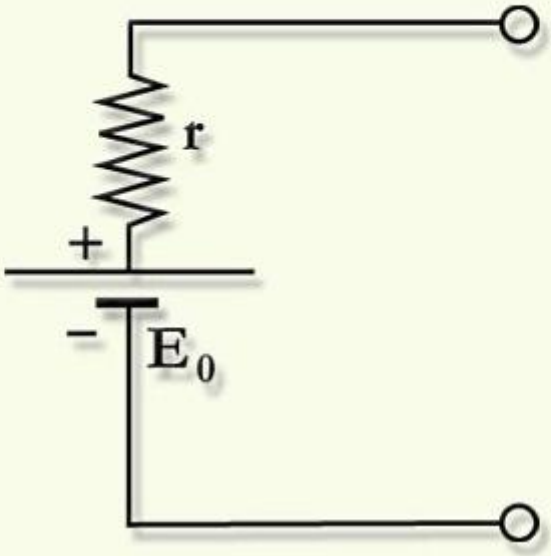
$$\sum_{i=1}^{i=n} I_i = \sum_{j=1}^{j=m} I_j$$

Générateur de tension continue

Ce générateur peut être, par exemple :
a) une pile,
b) un accumulateur,
c) une dynamo,
d) une source alternative suivie d'un redresseur.

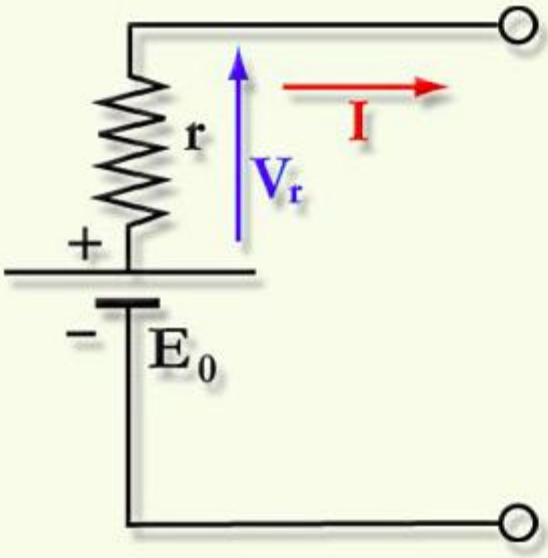
Le générateur à courant continu porte aussi le nom de source de tension continue. Si le générateur ne possède pas de résistance interne, on parle de source de tension pure. Aucun générateur réel ne répond à ce critère. On utilise cette notion si la résistance interne peut être considérée comme négligeable aux vus du reste du circuit.

Un générateur à courant continu est donc constitué d'une force électromotrice E_0 et d'une résistance (appelée résistance interne) r placée en série. Le schéma du générateur se présente comme suit :



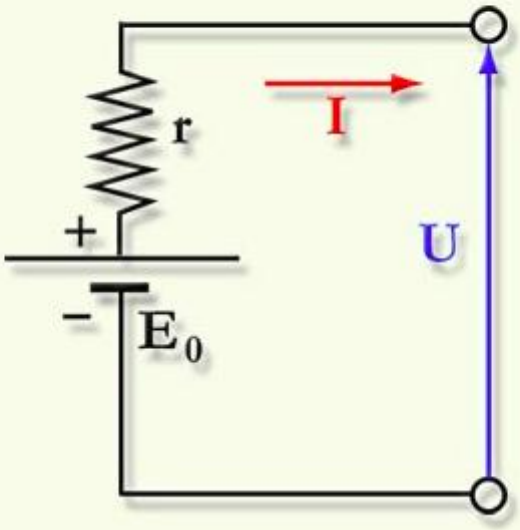
© J.Pannee

Considérons que le générateur délivre un courant I. Il en résulte une chute de tension V_r aux bornes de la résistance r due à la loi d'Ohm valant :

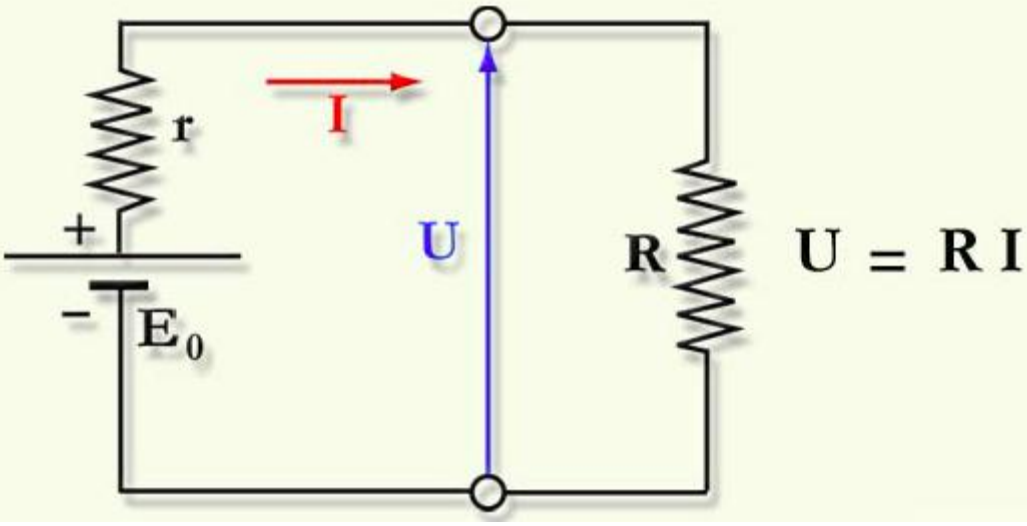


$$V_r = r\,I$$

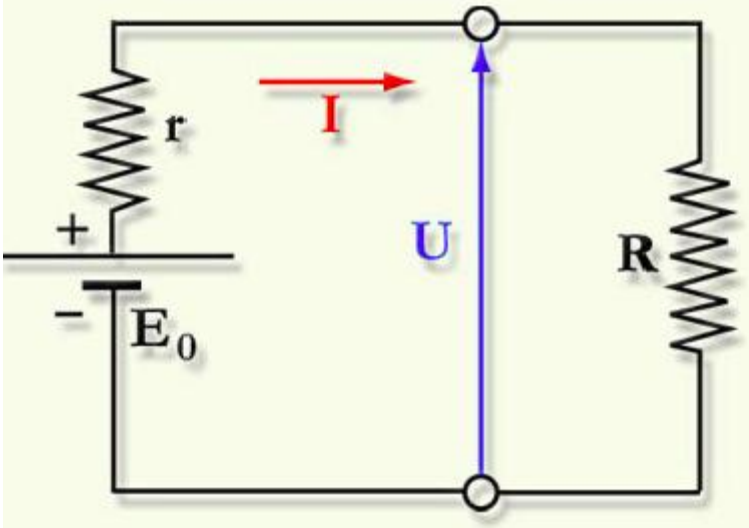
De ce fait, la tension U délivrée par le générateur est différente de E_0 et dépend de la valeur du courant I.



Pour qu'un courant I soit délivré par le générateur, il faut que ce dernier soit connecté à une charge. Considérons, pour simplifier, que la charge soit une résistance R. La chute de tension aux bornes de R n'est autre que U.

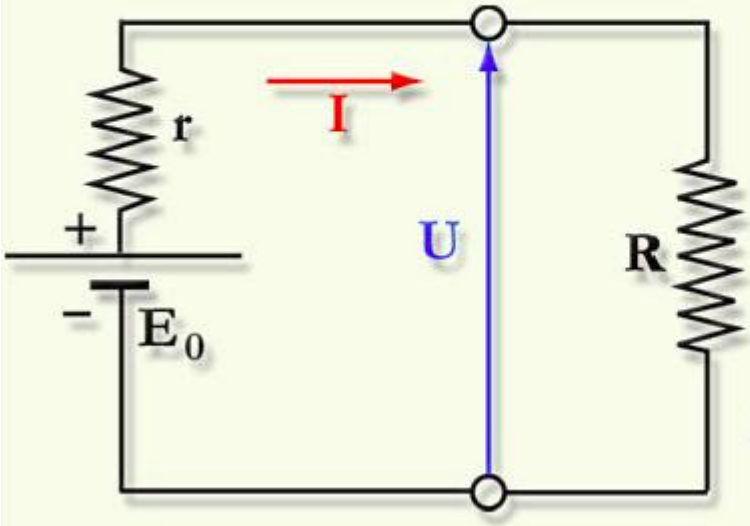


Nous avons maintenant, un circuit fermé. Nous pouvons appliquer la loi de Kirchhoff des mailles. Celle-ci dit que, dans un circuit fermé (une maille), la somme des forces électromotrices est égale à la somme des chutes de tension :



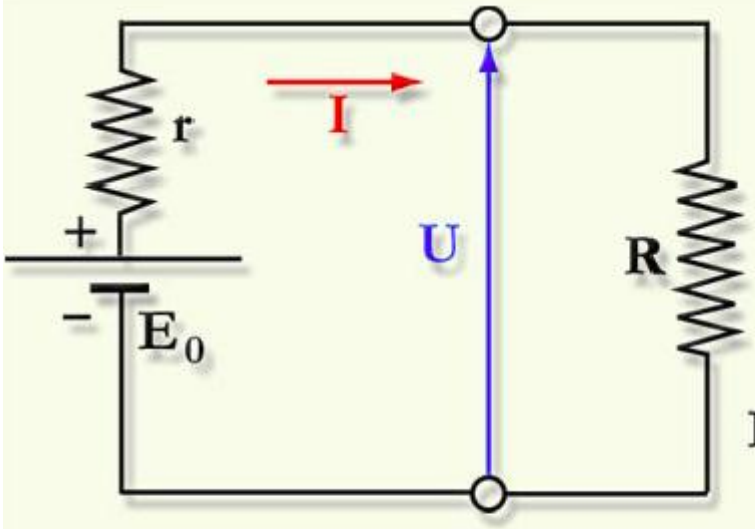
$$\Sigma E_{0_i} = \Sigma V_i$$

Nous pouvons donc écrire, pour notre circuit :



$$\Sigma E_{0_i} = \Sigma V_i$$

$$E_0 = V_r + U$$



$$\Sigma E_{0_i} = \Sigma V_i$$

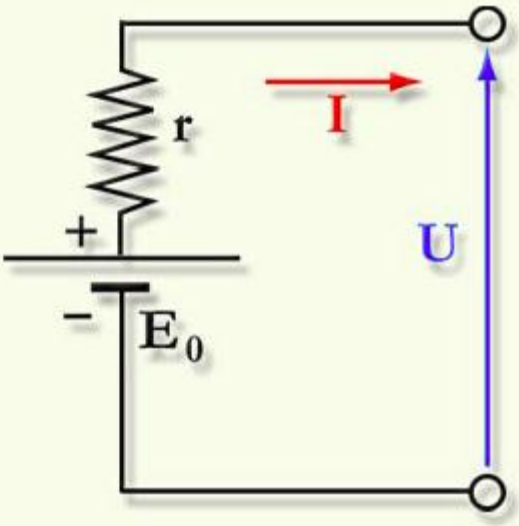
$$E_0 = V_r + U$$

Or :

$$V_r = r\,I$$

Donc :

$$E_0 = r\,I + U$$



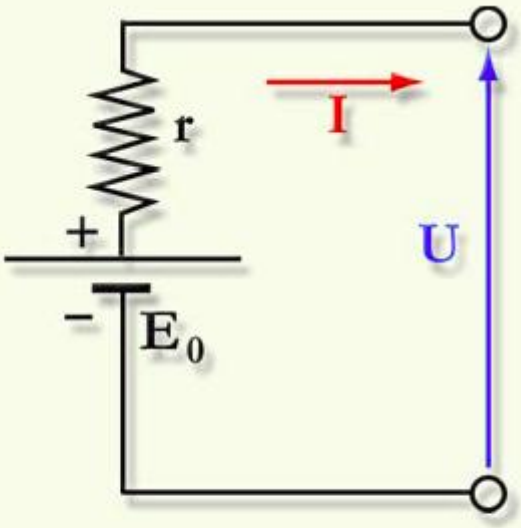
$$\Sigma E_{0_i} = \Sigma V_i$$

$$E_0 = V_r + U$$

$$V_r = r\,I$$

Faisons abstraction de la charge et considérons seulement le générateur. Nous pouvons donc écrire :

$$E_0 = r\,I + U$$



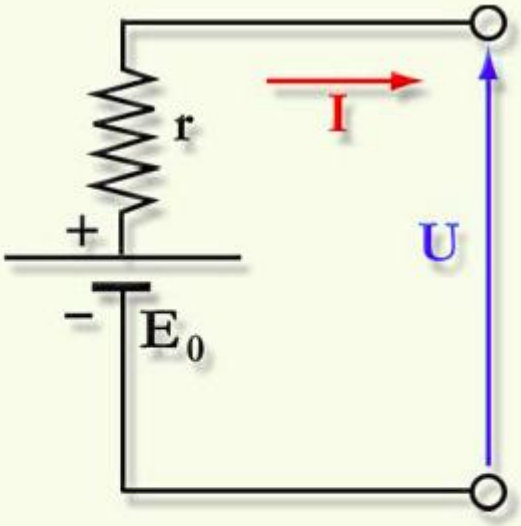
$$\Sigma E_{0_i} = \Sigma V_i$$

$$E_0 = V_r + U$$

$$V_r = r\,I$$

$$E_0 = r\,I + U$$

Cette équation est la formule de base du générateur à courant continu.



$$\Sigma E_{0_i} = \Sigma V_i$$

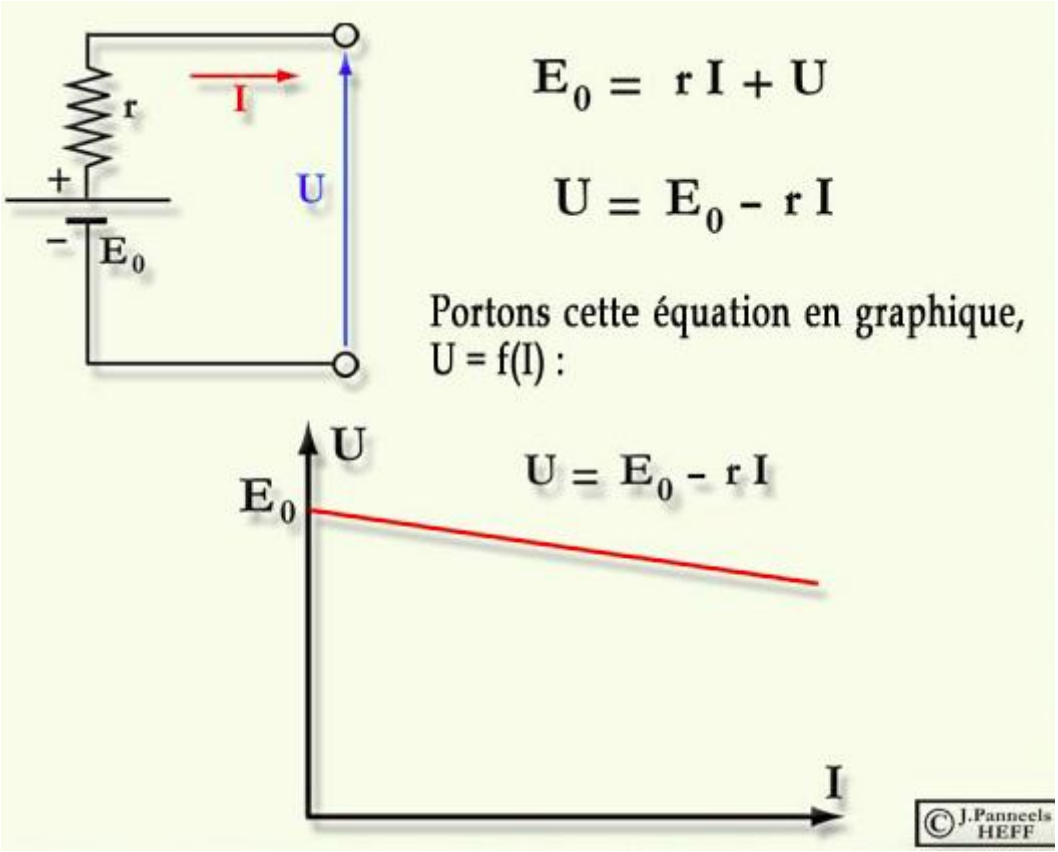
$$E_0 = V_r + U$$

$$V_r = r\,I$$

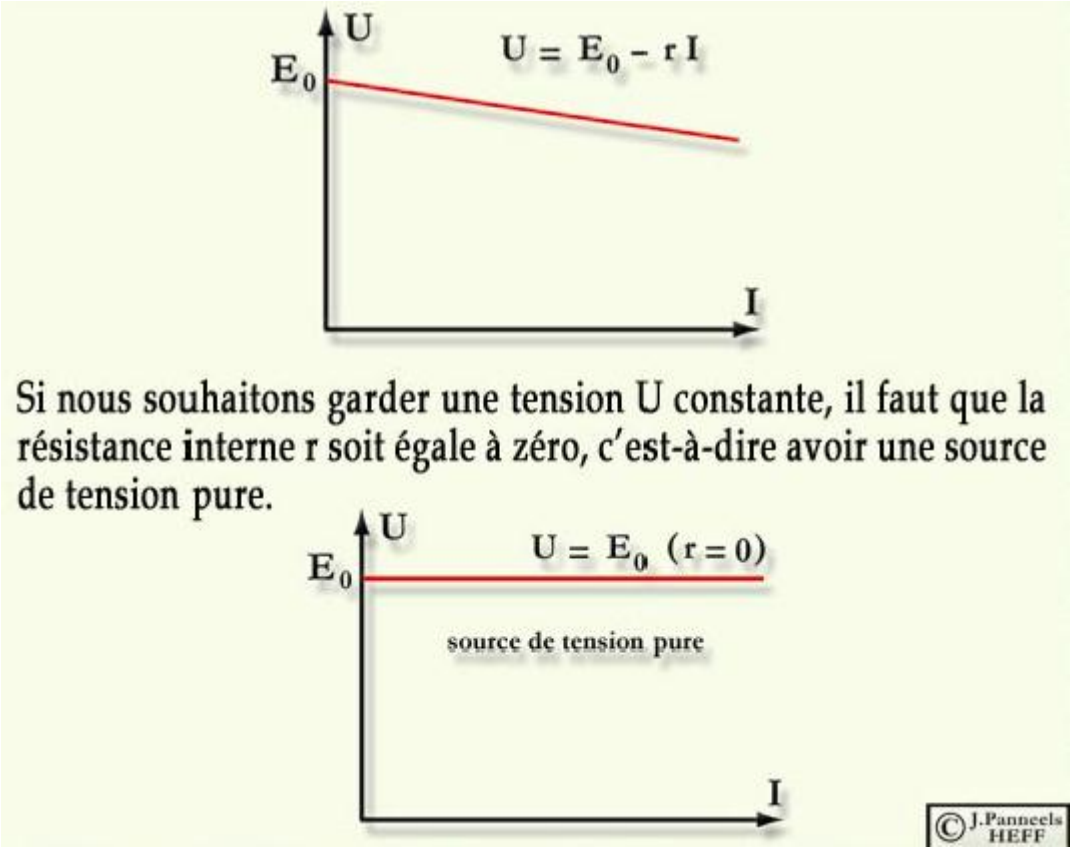
$$E_0 = r\,I + U$$

Nous pouvons également écrire :

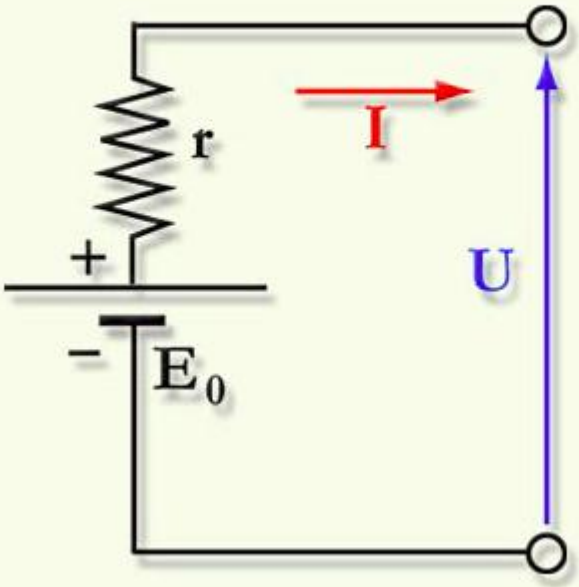
$$U = E_0 - r\,I$$



Ce graphique porte le nom de caractéristique externe du générateur.

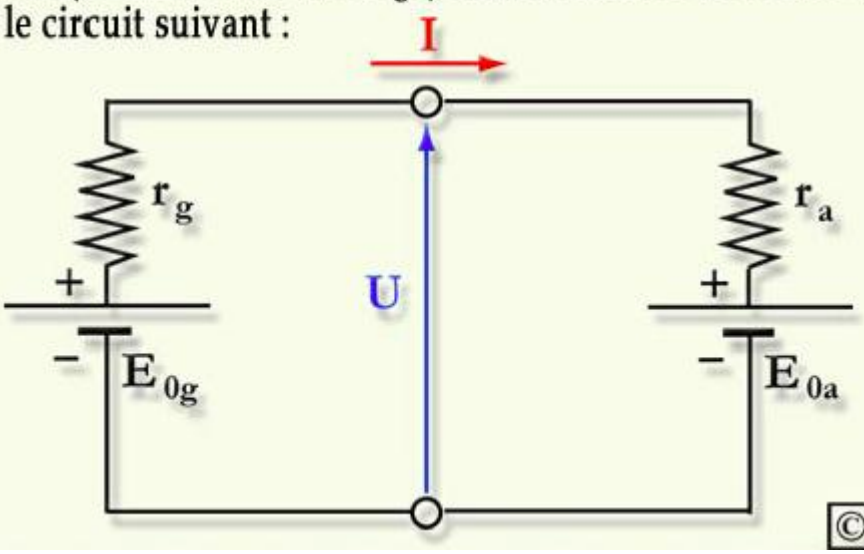


Un accumulateur à courant continu peut fonctionner en générateur. Il délivre un courant et possède une force électromotrice E_0. Il agit comme une pile :

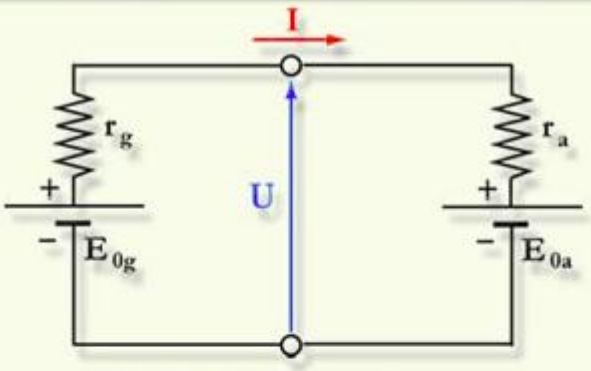


© J.Panneels HEFF

Lorsqu'il s'est déchargé, il convient de le recharger. Il constitue alors, dans un circuit électrique, une charge. Il contient toujours cependant une force électromotrice E_0. Cette charge spéciale ne suit plus la loi d'Ohm simplifiée (V = RI). Pour être rechargé, il faut l'alimenter par un générateur à courant continu délivrant un courant I (le courant de recharge) sous une tension U. Nous avons donc le circuit suivant :



© J.Panneels HEFF



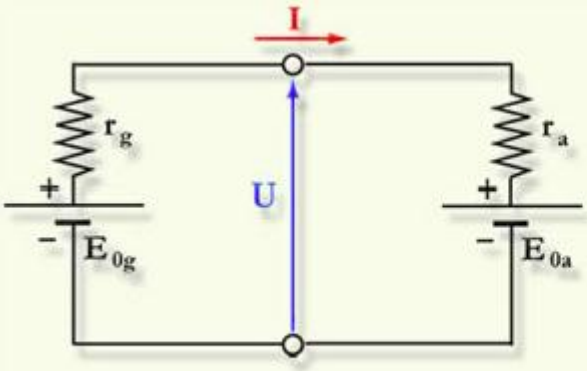
Pour que le courant circule du générateur vers l'accumulateur en recharge, il faut que E_{0g} soit supérieure à E_{0a}. Dans ce cas de figure, E_{0g} est une force électromotrice, tandis que E_{0a} est une force contre-électromotrice. Si nous appliquons la loi de Kirchhoff des mailles à ce circuit, E_{0a} possède un signe négatif. Donc, l'équation générale :

$$\Sigma E_{0_i} = \Sigma V_i$$

donne

$$E_{0g} - E_{0a} = r_g I + r_a I$$

© J.Panneels HEFF



$$\Sigma E_{0_i} = \Sigma V_i$$

$$E_{0g} - E_{0a} = r_g I + r_a I$$

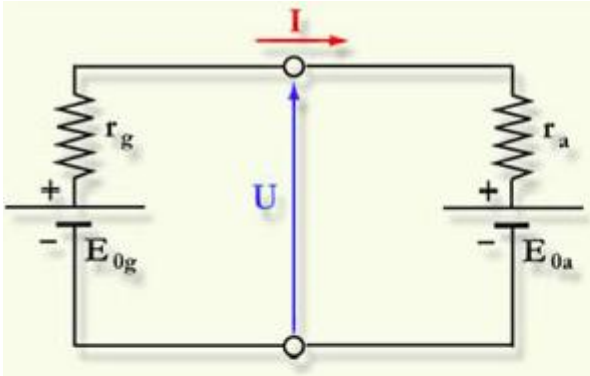
Nous pouvons écrire :

$$E_{0g} - r_g I = E_{0a} + r_a I$$

Or, nous avons vu que pour le générateur, on a :

$$U = E_{0g} - r_g I$$

© J.Panneels HEFF



$$\Sigma E_{0_i} = \Sigma V_i$$

$$E_{0g} - E_{0a} = r_g I + r_a I$$

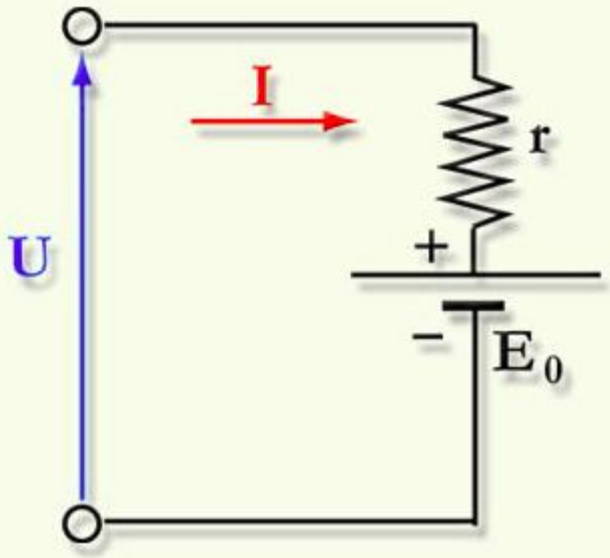
$$E_{0g} - r_g I = E_{0a} + r_a I$$

$$U = E_{0g} - r_g I$$

Donc, pour le circuit récepteur (l'accumulateur en recharge), on a :

$$U = E_{0a} + r_a I$$

Donc, si nous ne regardons que l'accumulateur en recharge, donc, pour un système comportant une force contre-électromotrice et une résistance en série, nous avons :



$$U = E_0 + r I$$

Electromagnétisme

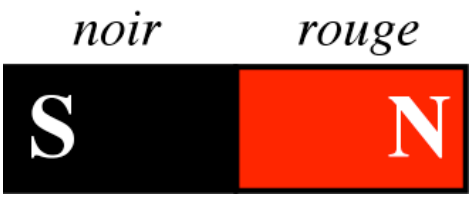
Les champs magnétiques

Les sources de champs magnétiques existent à l'état naturel (la Terre, aimant naturel) ou peuvent être créées artificiellement (aimant, électro-aimant).

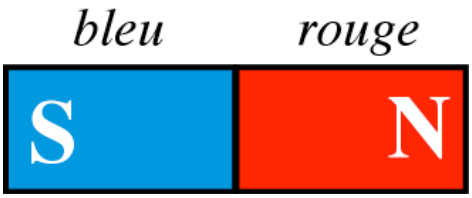
L'unité du champ magnétique *B* est le Tesla (T)

Le champ magnétique se mesure donc avec un teslamètre.

Schéma d'un aimant :



Ou



Bipolarité

Un champ magnétique possède toujours un pôle nord et un pôle sud. Ils sont indissociables.

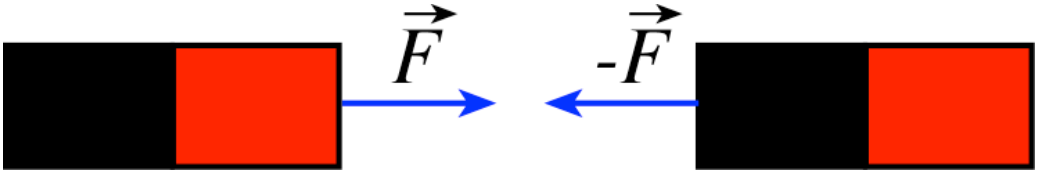
Si on casse un aimant …

… on obtient deux aimants.

Action d'un champ magnétique sur un aimant : attraction - répulsion

Si on approche deux pôles de même polarité, les aimants se repoussent.

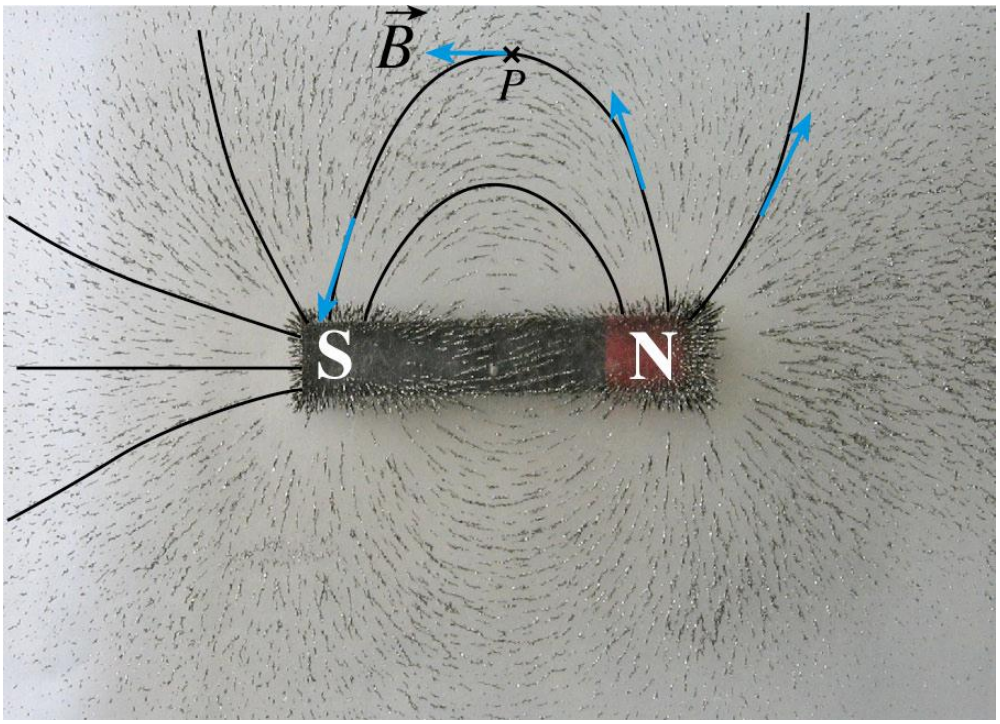
Si on approche deux pôles opposés, les aimants s'attirent.



Les forces dépendent de l'intensité du champ magnétique et de la distance entre les deux aimants.

Visualisation du champ magnétique

Des grains de limaille de fer, saupoudrés autour d'un aimant, vont s'orienter selon les lignes de champ.



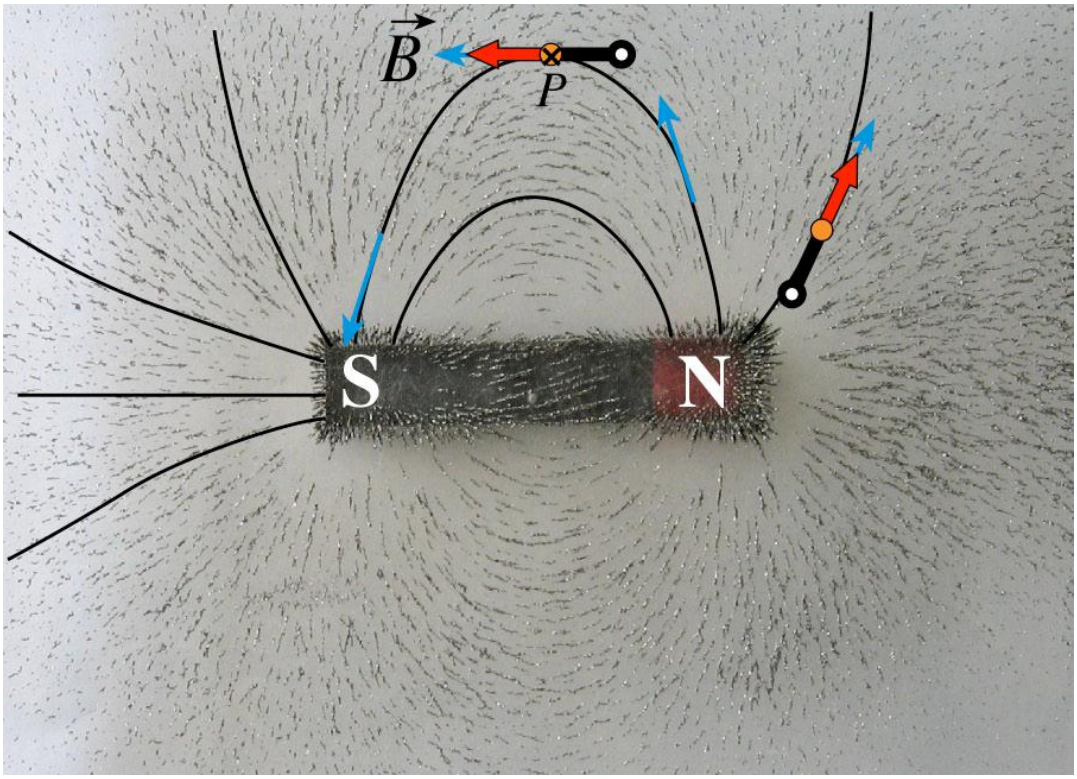
Spectre d'un aimant droit et symbolisation de quelques lignes de champs et de quelques vecteurs « champ magnétique ».

- Les lignes de champs montrent l'orientation du champ magnétique.
- La densité de lignes de champ informe sur l'intensité du champ magnétique.
- La figure formée par la limaille de fer s'appelle un spectre magnétique.

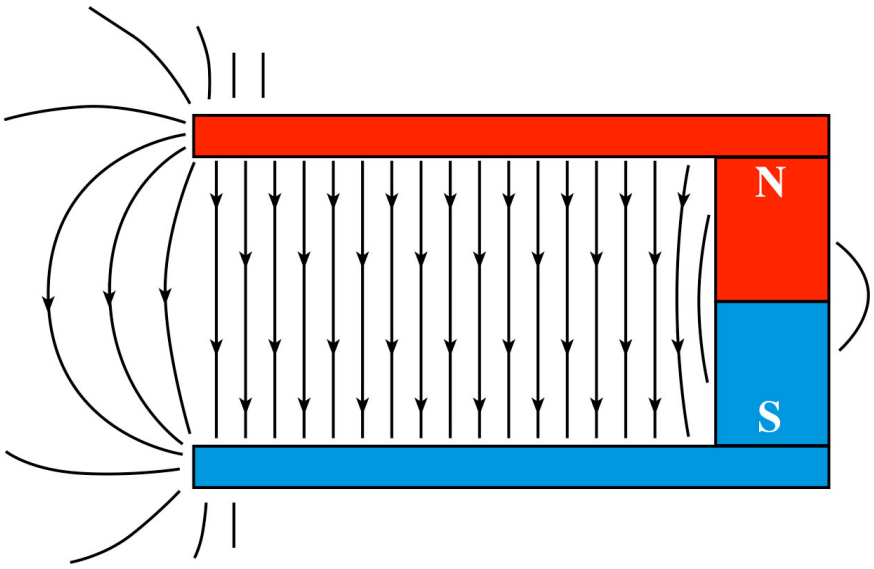
Le champ magnétique *B* est une grandeur **vectorielle**.

Il varie en direction et en intensité selon l'endroit considéré :

- Les lignes de champ vont du pôle nord vers le pôle sud.
- Le champ *B* est tangent aux lignes de champs.
- Si on place une boussole au point P, son pôle nord va s'orienter dans la direction de *B*.



Les boussoles s'orientent selon les lignes de champ.



Lignes de champ entre les armatures d'un aimant en U (Toutes les lignes de champ extérieures ne sont pas dessinées)

Observation :

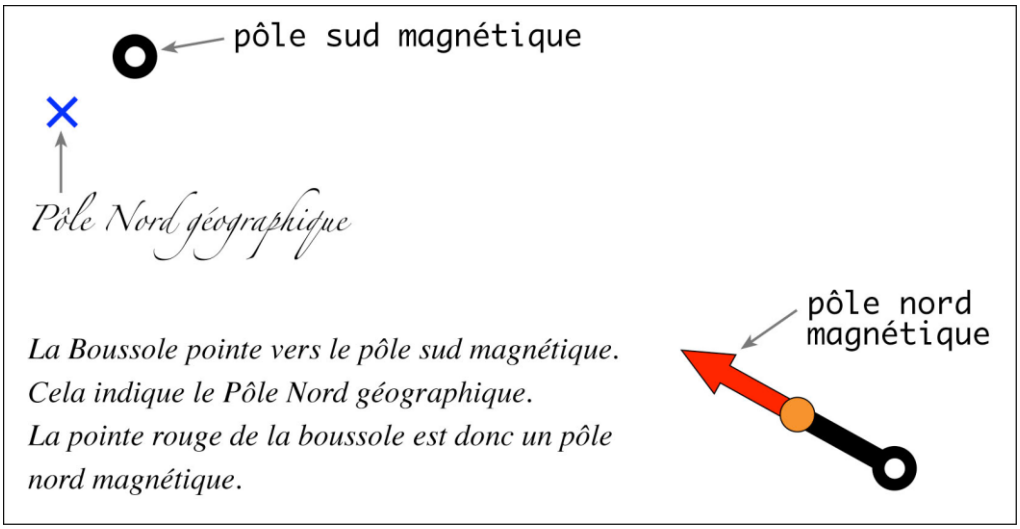
-A l'intérieur d'un aimant en U le champ magnétique est constant en intensité et en direction.

On dit qu'il est uniforme.

Comment déterminer le pôle d'un aimant

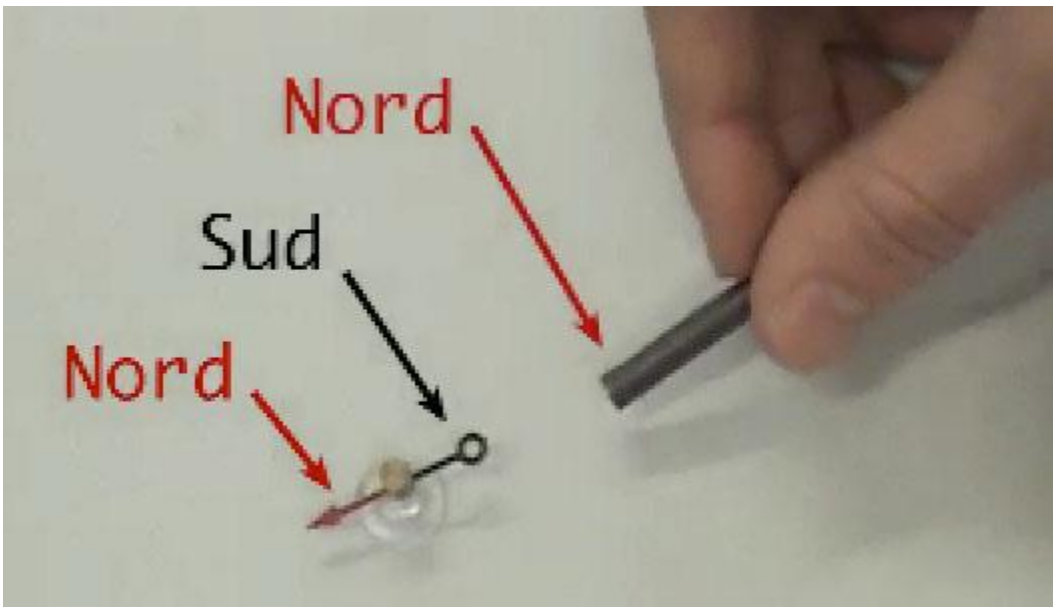
Il faut au préalable connaître la polarité d'un aimant.

Par exemple celui de la Terre (voir l'image ci-dessous)



Le pôle géographique et le pôle magnétique sont décalés de 11° par rapport au centre de la Terre.

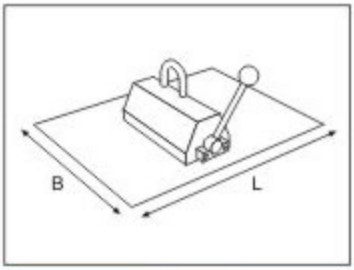
Ensuite il suffit de constater la répulsion ou l'attraction entre l'aimant dont on veut déterminer lespôles et l'aimant dont on connaît la polarité.



Le barreau aimanté présente un pôle nord à la boussole

Utilisations industrielles

- Moteurs à aimants permanents
- Générateurs de tension
- Manutention



Crochet de manutention à aimant permanent

L'aimant est à l'intérieur de la boîte jaune. La poignée permet d'approcher l'aimant près de l'objet (composé de fer) à manipuler.Le crochet permet la manipulation avec un engin de levage (treuil par exemple)

Champ magnétique crée par un courant

La source microscopique d'un champ magnétique est le déplacement de charges électriques. Un courant électrique étant un déplacement de charges électrique va donc générer un champ magnétique. Cette propriété est utilisée dans de nombreux systèmes électrotechniques :

Levage de boîtes de conserves avec un électro-aimant

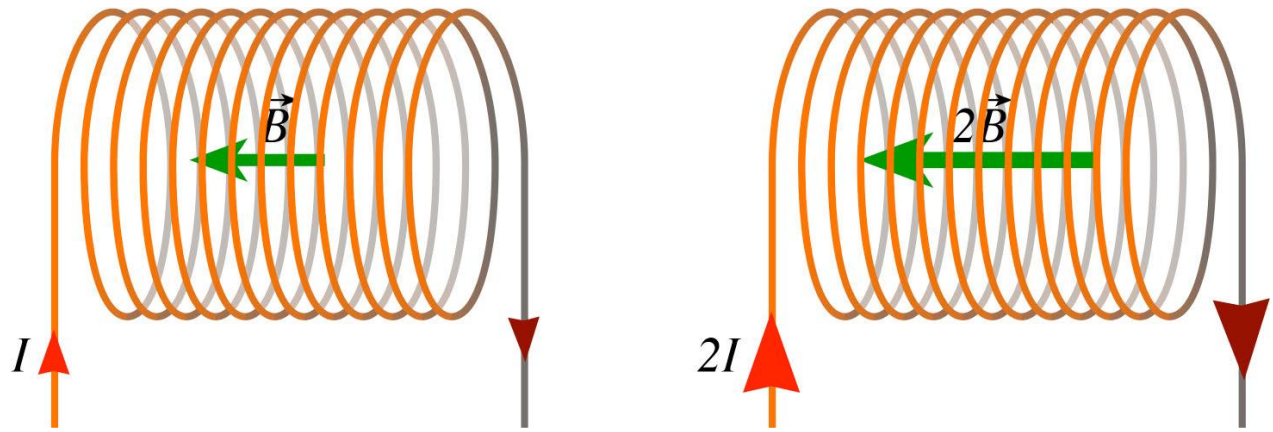
électro-aimants actionnant la gâchette d'une porte d'entrée

Stator d'un moteur bipolaire

train à sustentation magnétique Maglev - http://maglev.de/

L'intensité du champ magnétique est proportionnelle au courant qui le crée :

$$\boldsymbol{B = k \times I}$$

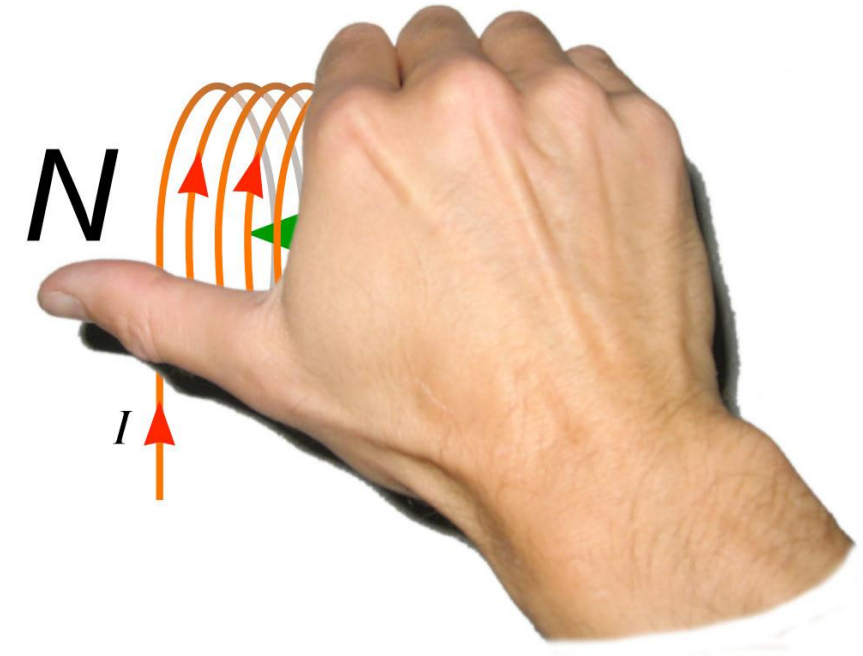


Si le courant double, le champ double.

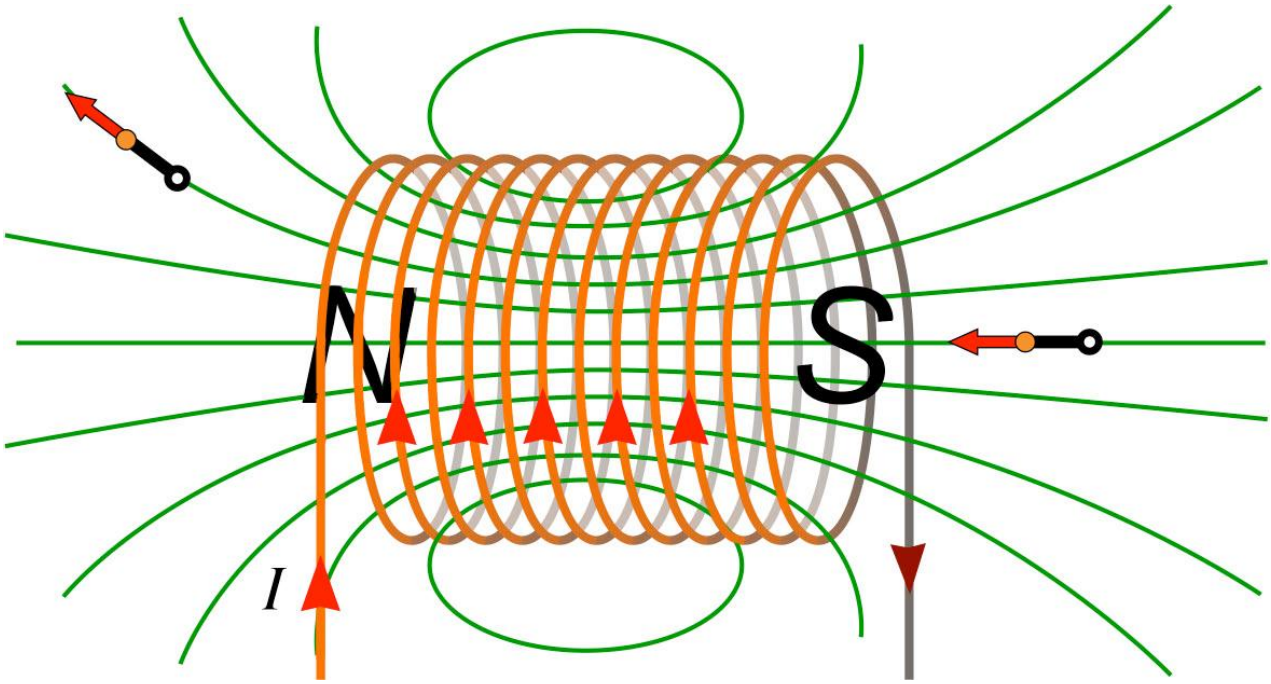
Dans la grande majorité des applications magnétiques du courant, le fil électrique sera enroulé en bobine. Cela permet d'augmenter les propriétés magnétiques du courant en variant le nombre de spires et en plaçant au centre de la bobine un noyau ferromagnétique.

Polarité d'une bobine parcourue par un courant – règle de la main droite

Placer votre main droite sur la bobine pour l'entourer dans le sens de circulation du courant. Votre pouce vous indiquera la face Nord de la bobine.

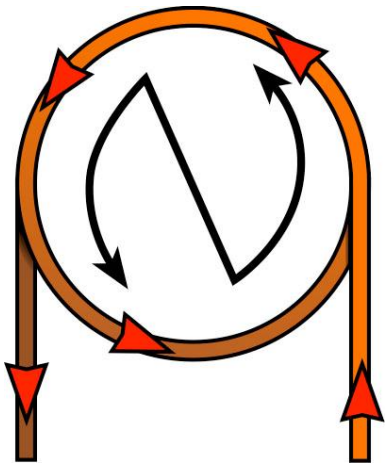


La règle de la main droite indique le pôle nord de la bobine.

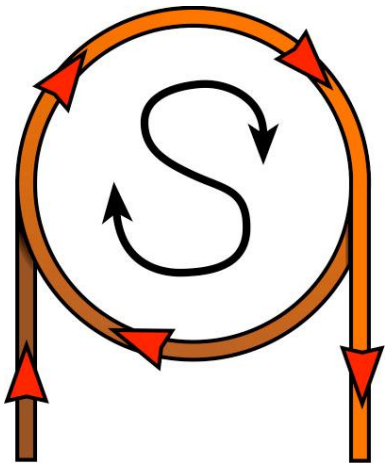


Lignes de champ d'un solénoïde

Une autre façon pour déterminer les pôles d'une bobine est de la placer selon son axe et d'observer le sens de rotation du courant.



face nord



face sud

Champ magnétique au milieu d'un solénoïde.

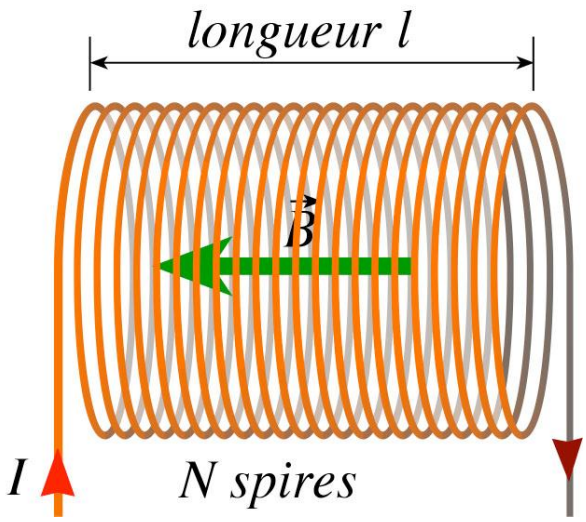
Un solénoïde est une bobine qui possède une longueur *l* et une répartition uniforme de *N* spires.

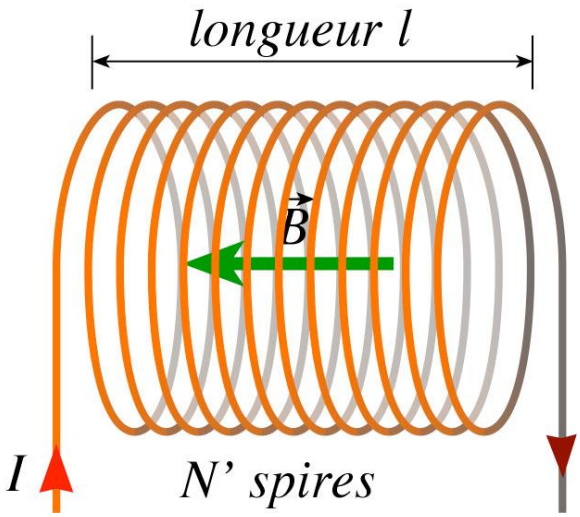
Nous avons vérifié expérimentalement que le champ magnétique s'exprimait de la façon suivante

$$\mathbf{B = \mu_0 \times N \times I / L}$$

L en mètres (m) ; *I* en ampères (A) ; *N* nombre de spires
μ_0 est la perméabilité du vide (ou de l'air)

$\mu_0 = 4\pi.10^{-7}$ u.s.i. = $1{,}257.10^{-6}$ u.s.i.





Le champ produit par ce solénoïde sera plus intense… … *que celui-ci.*

Excitation magnétique

Reprenons la formule :

$$\boldsymbol{B = \mu_0 \times N \times I / L}$$

Les termes *N*, *I* et *L* dépendent de la source de champ magnétique (la bobine).

Le terme μ_0 dépend du milieu qui se trouve au centre de la bobine (l'air).

On définit l'excitation magnétique ***H*** qui ne dépend que de la source.

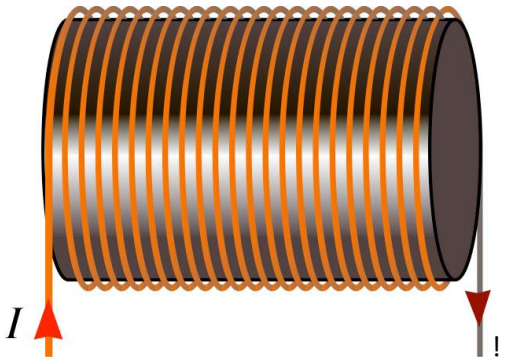
Pour le solénoïde l'intensité ***H*** (le module du vecteur) va s'exprimer :

$$H = N \times I / L$$

H s'exprime en ampères par mètre ($A.m^{-1}$).

Milieu ferromagnétique

Si l'on place un noyau ferromagnétique (alliage à base de fer) dans la bobine, le champ sera plus intense. Cette propriété est utilisée dans les moteurs électriques et les transformateurs.

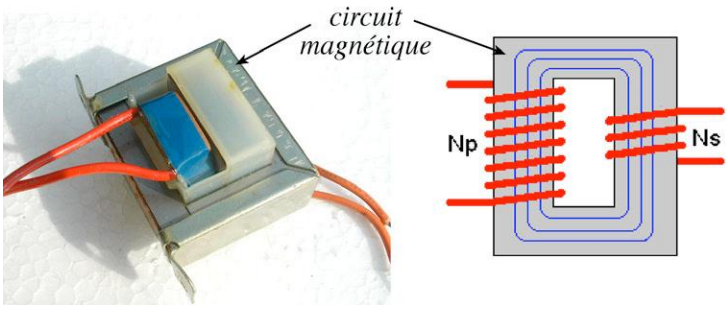


$$B = \mu \times H = \mu \times N \times I / L$$

µ est la perméabilité du matériau. µ est beaucoup plus grand que µ0.

Application du ferromagnétisme

- transformateur : il transforme une tension sinusoïdale de tension efficace *U1* en une autre tension de valeur efficace *U2* plus grande ou plus petite que *U1*. Le circuit magnétique canalise et intensifie le champ magnétique.
- Moteurs et générateurs électriques : tout le bâti en fer du moteur contribue au transfert d'énergie électromagnétique entre le rotor et le stator.

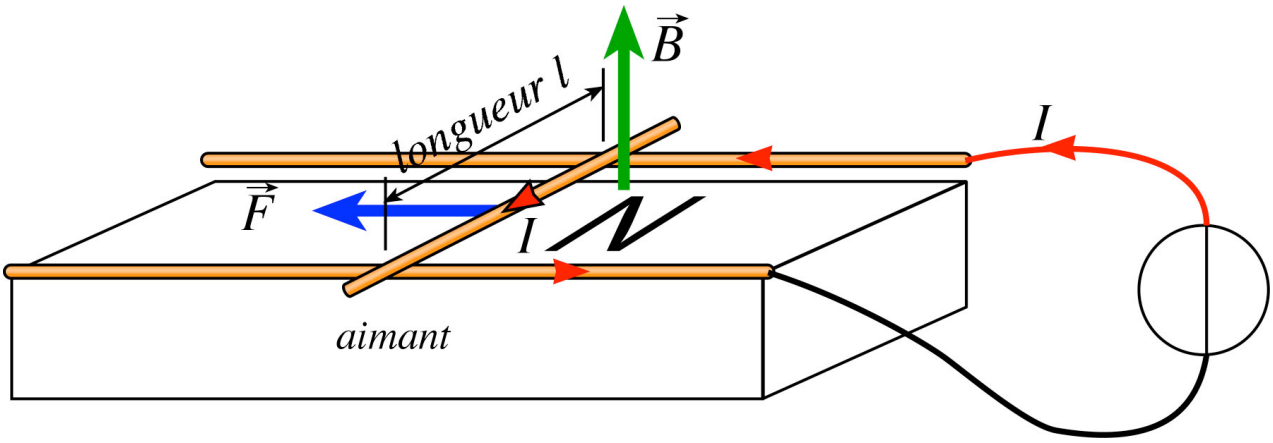


Transformateur

Moteur électrique

Force de Laplace

Vous avez pu constater que deux aimants peuvent s'attirer ou se repousser. Il existe donc une force magnétique. La force de Laplace est une des expressions de cette force.



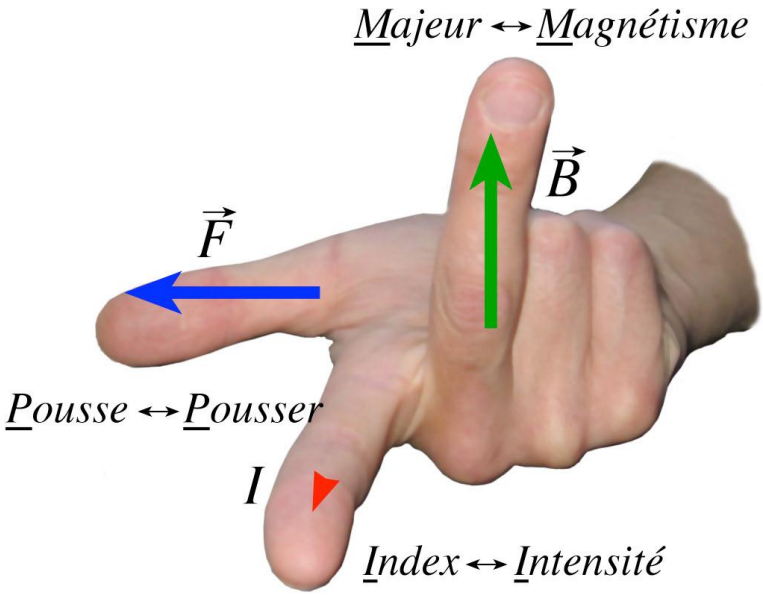
Expérience de Laplace : le barreau conducteur se déplace sur les deux rails.

Un conducteur de longueur *L*, placé dans un champ magnétique*B* et parcouru par un courant *I,* subit une force appelée force de Laplace.

$$\boldsymbol{F = L \times I \times B}$$

F en newtons (N), *I* en ampères (A), *L* en mètres (m), *B* en teslas (T).

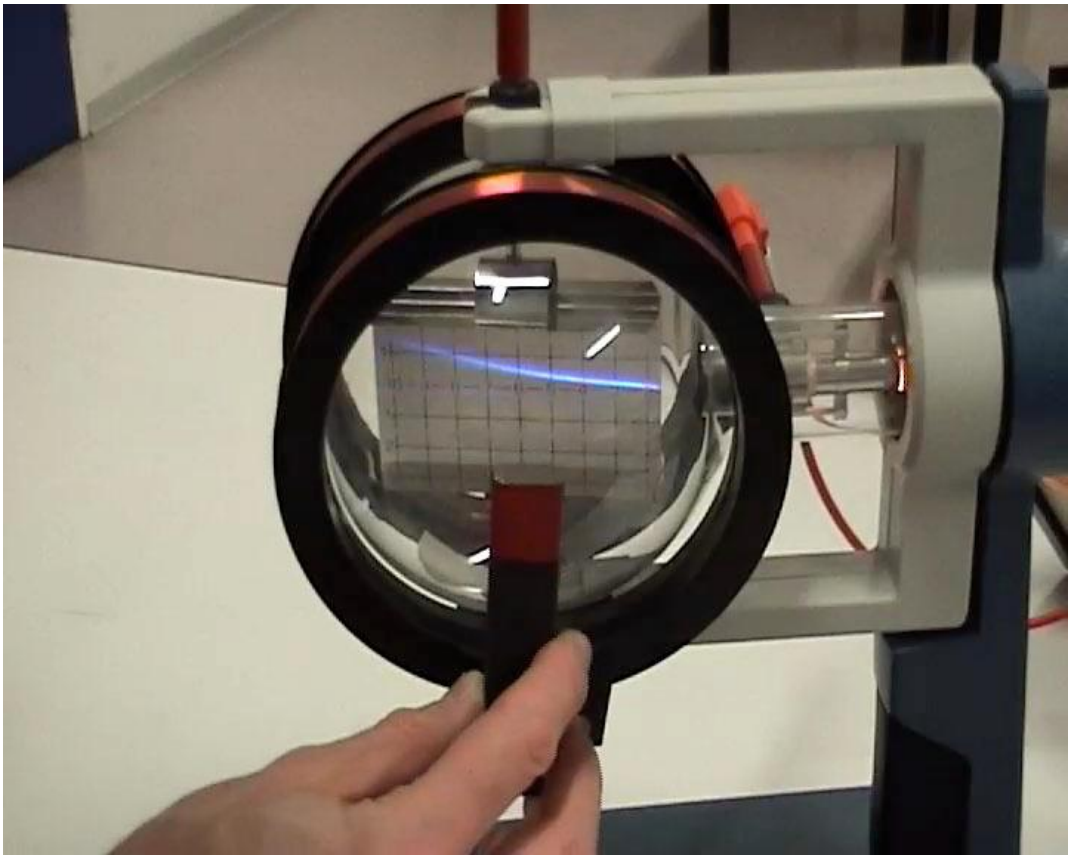
L'orientation de la force peut être déduite par la règle des trois doigts de la main droite :



Règle de la main droite : dans l'ordre F, I, B équivalent à pousse, index, majeur.

Tout comme un repère orthonormé (x,y,z), les trois doigts forment un trièdre trirectangle direct.

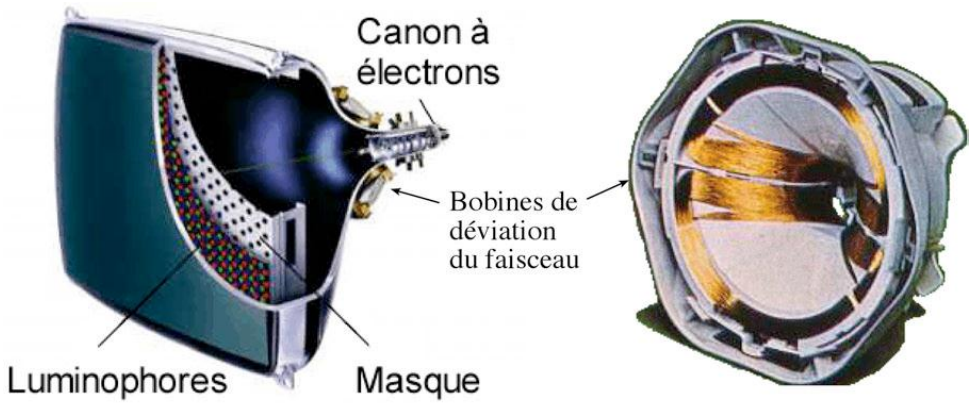
Un faisceau d'électrons étant un courant électrique dans le vide, subit également une force de déviation en présence d'un champ magnétique.



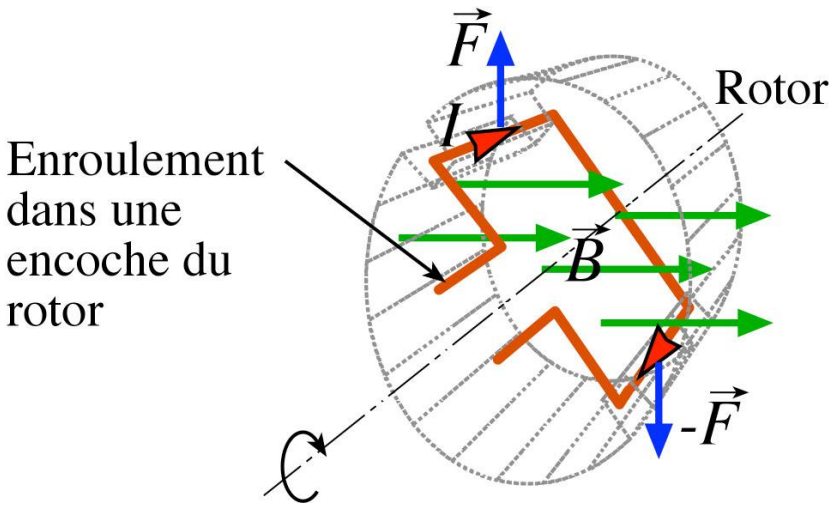
Déviation d'un faisceau d'électron.

Application de la force de Laplace

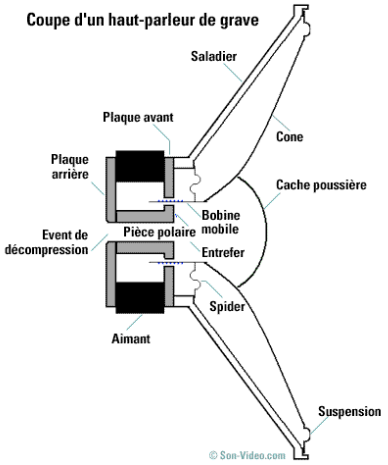
- Téléviseur : c'est le principe utilisé dans les tubes cathodiques des téléviseurs et des écrans d'ordinateurs (attention : ce n'est plus le cas dans les écrans plats).
- Moteur électrique : le champ magnétique du stator applique des forces de Laplace sur les conducteurs du rotor qui se met en rotation.
- Haut-parleur: le signal électrique fait vibrer la membrane du haut-parleur sur le principe de la force de Laplace.



Ecran cathodique



Force sur le rotor d'un moteur

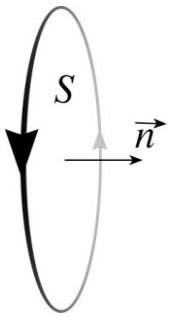


Haut-parleur

Vecteur surface

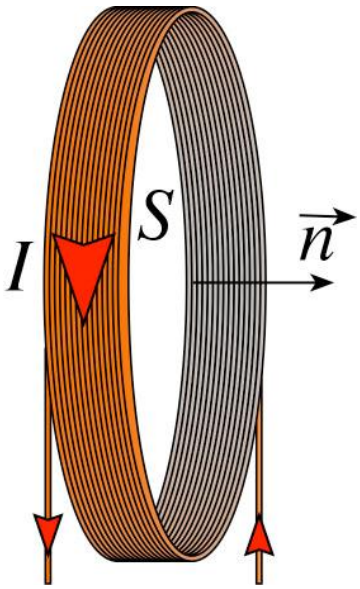
Soit une surface *S* délimitée par un cercle ; on choisit un sens de parcours sur le cercle et on définit le vecteur unitaire *n* normal à la surface avec la règle de la main droite (voir paragraphe précédent).

On peut également définir le vecteur



S* = *S* . *n

Pour une bobine parcourue par un courant, le sens de parcours sera donné par le sens du courant. Et donc *n* est orienté comme le champ magnétique généré par la bobine (*n* pointe vers la face nord de la bobine).



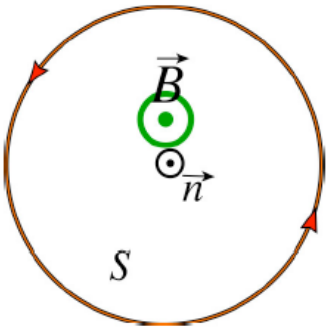
Représentation d'un vecteur perpendiculaire au plan de la feuille

⊙ ***Ce symbole est celui d'un vecteur qui pointe vers vous.***

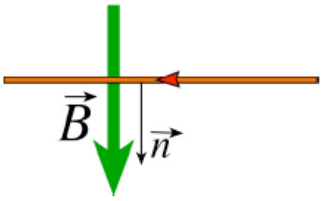
⊗ ***Ce symbole est celui d'un vecteur qui s'éloigne de vous.***

Flux magnétique

Le flux magnétique représente la quantité de champ magnétique « vu » à travers les spires d'un enroulement (une bobine). Le flux change selon l'orientation de la bobine par rapport au champ magnétique.



Une spire traversée par un champ magnétique (vue de face).

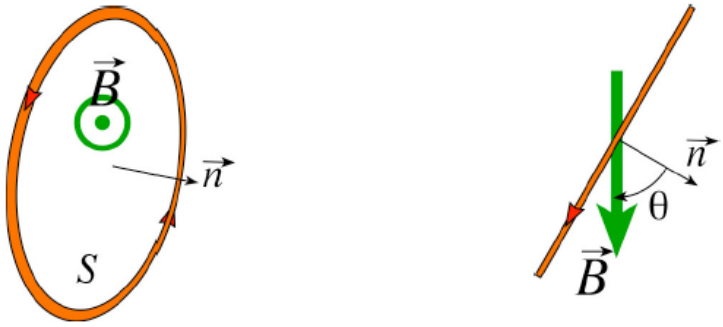


Vu d'au-dessus, l'angle entre la normale à la surface et le champ est nul.

L'angle $\theta = \left(\vec{B}\ \vec{n}\right)$ *est nul.*

$\cos\theta = 1$

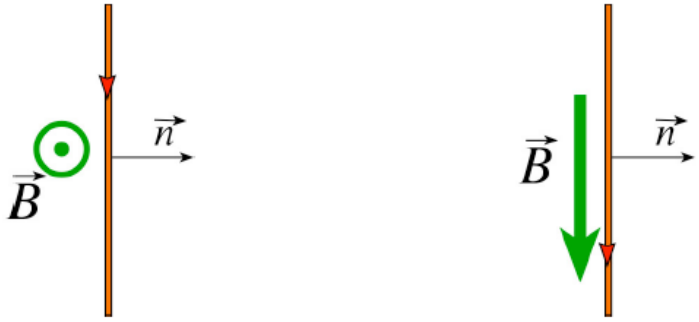
Le flux est maximum



La surface « vue » par le champ magnétique dépend de l'angle θ.

$S_{vue} = S \times \cos\theta$

Vu d'au-dessus, la normale à la surface et le champ s'écartent d'un angle θ (théta)



L'angle $\theta = \left(\vec{B}\ \ \vec{n}\right)$ *fait 90°.*

$\cos\theta = 0$

Le flux est nul.

Le champ magnétique ne traverse pas la spire

Le flux magnétique Φ à travers un circuit est le produit du champ magnétique par la surface apparente que lui présente le circuit.

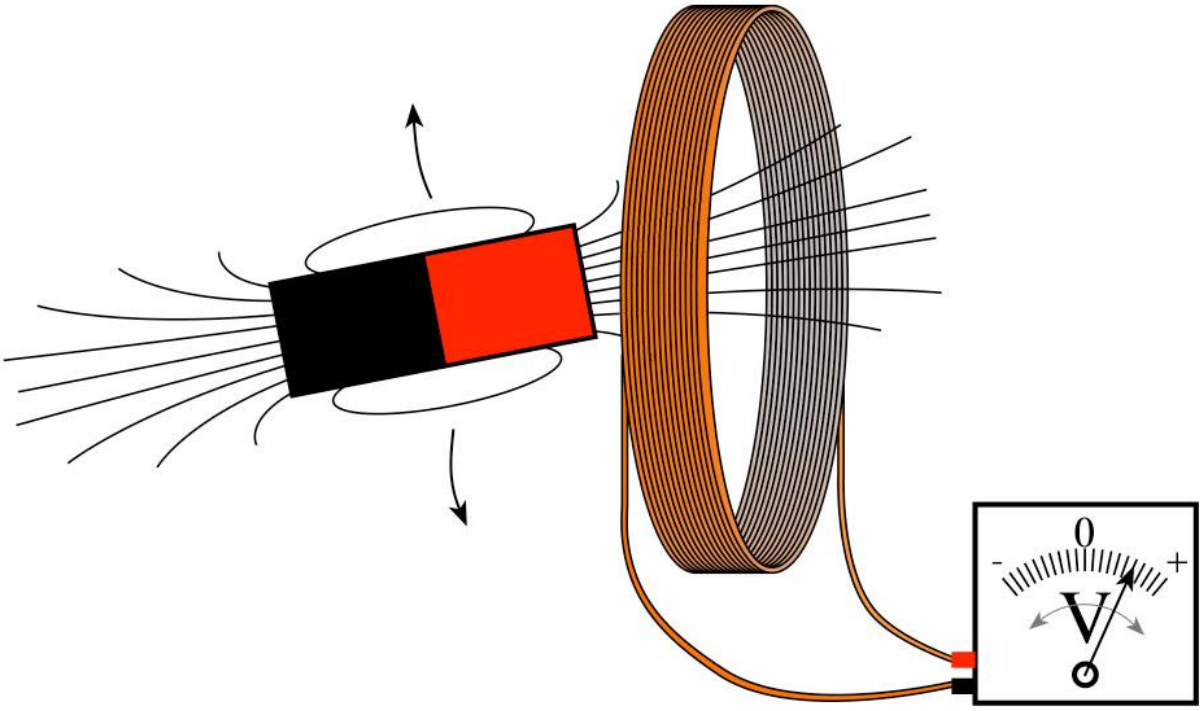
$\Phi = B \times S \times \cos\theta$

L'unité du flux est le Weber (Wb).

θ (théta) est l'angle entre la normale *n* à la surface et le champ magnétique *B*.

Force électromotrice (fém ou f.é.m.)

Expérience : si on remue un aimant devant une bobine, non alimentée, on observe une tension à ses bornes.



Création d'une force électromotrice

Le champ magnétique applique une force sur les électrons de la bobine. Cette force induit une tension électrique appelée force électromotrice.

Dans quel cas observe-t-on une force électromotrice ?

- l'aimant bouge devant la bobine
- la bobine bouge devant l'aimant

Dans quel cas la f.é.m. est nulle ?

- l'aimant est immobile par rapport à la bobine.

Plusieurs expériences permettent de comprendre que pour observer une f.é.m. aux bornes de la bobine, il faut une variation de flux. D'où la loi de Faraday.

Loi de Faraday

Tout circuit soumis à une variation de flux, voit apparaître à ses bornes une force électromotrice (tension) e telle que :

$$\textit{fem (V)} \longrightarrow e = -\frac{d\Phi}{dt} \longleftarrow \begin{array}{l}\textit{variation du flux } \Phi \\ \textit{en fonction du temps } t\end{array}$$

Règle du flux maximum

Les interactions entre deux sources de champ magnétique sont telles que le flux devient maximum.

Cette règle permet d'expliquer la rotation des moteurs électriques comme le moteur à courant continu.

Induction électromagnétique et courant induit

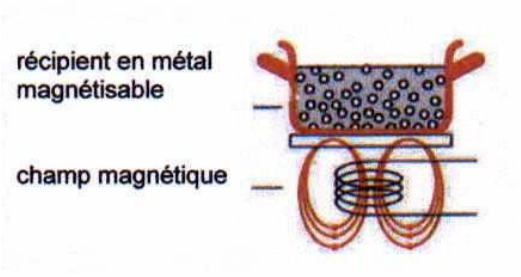
La bobine, soumise à une variation de flux, devient donc une source de tension électrique (f.é.m.).

Si on ferme le circuit de la bobine, un courant va s'établir. Comme il s'agit d'un courant induit par un champ magnétique, on parle de courant induit et d'induction électromagnétique.

Un champ magnétique, variable, induit un courant.

Exemples :

- **Les alternateurs** des centrales électriques utilisent ce principe pour produire la tension et le courant du réseau EDF. Sans la rotation de la machine, il n'y aurait pas variation de flux et donc pas de f.é.m.
- **Le transformateur** utilise ce principe pour transférer l'énergie de la bobine primaire à la bobine secondaire. Pour qu'il y ait variation de flux, la bobine primaire du transformateur doit être alimenté en courant variable (sinuosïdal). En courant continu, le champ serait constant et la fem au secondaire nulle.
- **Frein à courant de Foucault** (voir plus loin).
- **Four à induction industriel** Un fort champ magnétique induit des courants dans le métal à fondre. Ce courant induit provoque des pertes par effet joule qui fait fondre le métal.
- **Plaque à induction.**Une plaque à induction produit un champ magnétique sinusoïdal à 5 kHz. Ce champ induit des courants dans la casserole (surtout le fond). Le fond de la casserole doit être suffisamment résistif pour que le courant induit génère de la chaleur par effet joule (RI^2) qui chauffe le contenu.



Principe

Plaque à induction ouverte, on voit bien la bobine inductrice.

Auto-induction

Mettons une bobine sous tension.

1. Le courant génère un champ magnétique croissant.

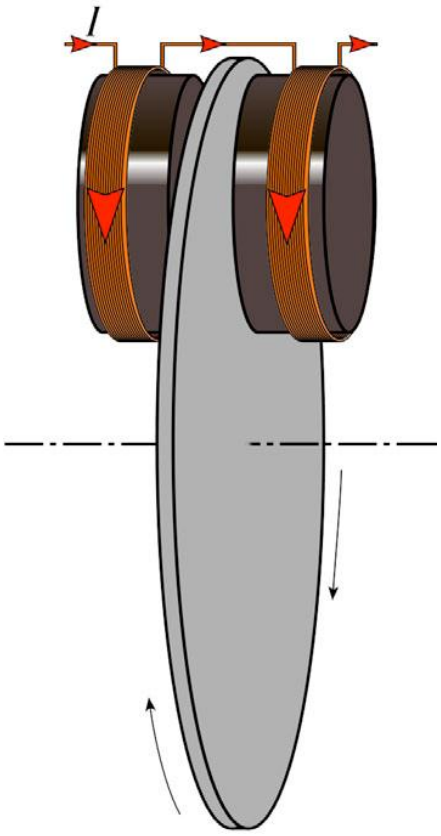
2. Le champ magnétique croissant génère un flux magnétique croissant à travers la bobine elle-même (d'où le nom d'auto-induction).
3. Une f.é.m. et un courant induit apparaissent dans la bobine. Ils sont négatifs.
4. Le courant induit étant négatif, le champ magnétique induit s'oppose au champ magnétique inducteur (point 1). Ce principe est énoncé par la loi de Lenz.
5. Le champ résultant est la somme des champs inducteur et induit.
6. Le courant résultant est la somme des courants inducteur et induit.

Loi de Lenz

Le sens du courant induit est tel que les effets qu'il produit s'opposent à la cause qui lui donne naissance.

Exemples

- **Frein à courant de Foucault.** Lorsque le chauffeur de camion appuie sur la pédale de frein, il alimente en courant les bobines des électroaimants. Le flux variable résultant, traverse le disque dans lequel apparaît des courants induits appelés courants de Foucault. Ces courants génèrent des forces qui s'opposent à la rotation du disque et freinent le camion.



Principe du frein à courant de Foucault

Les vélos de salon possèdent un frein à courant de Foucault.

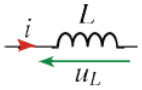
Inductance propre d'un circuit

Nous avons déjà parlé précédemment du phénomène d'auto-induction.
Donc toute bobine est soumise à son auto-induction. C'est inévitable. On définit alors l'inductance propre (ou simplement inductance) du composant.

En combinant les différentes relations : $e = -\frac{d\Phi}{dt}$; $\Phi = B \times S$ et $B = \mu \frac{N}{l} I$,

on peut en déduire une relation donnant la tension u_L aux bornes de la bobine en fonction du courant i qui la traverse (en convention récepteur).

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



où L, appelée inductance de la bobine, englobe les termes constants, μ, N, l, S des équations précédentes.

L se mesure en henry (H) – exemple : L=100 mH, u_L en volts (V), i en ampère (A), t en secondes (s)

Energie emmagasinée dans une bobine

Lorsqu'une bobine est mise sous tension, elle emmagasine une certaine quantité d'énergie sous forme magnétique. Cette énergie s'exprime.

$$W = \frac{1}{2} L I^2$$

I en ampère (A), L en henry (H), W en joules (J)

Questions cours d'électricité

Electricité statique

- Notion de charge électrique
- Force électrostatique
- Notion de champ électrique
- Notion de conducteur, d'isolant, de diélectrique

Condensateurs :

- Equation d'un condensateur
- Mise en série
- Mise en parallèle
- Constitution/fabrication
- Energie stockée dans un condensateur

Résistances :

- Equation d'une résistance
- Loi de Pouillet / notion de résistivité
- Mise en série
- Mise en parallèle
- Constitution/fabrication et caractéristiques d'une résistance réelle
- Pertes par effet Joule

Electrocinétique

- Notion de courant électrique
- Force électromotrice
- Loi des mailles (Kirchoff)
- Loi des nœuds (Kirchoff)
- Générateur de tension continue idéal et réel
- Accumulateur (charge et décharge)
- Champ magnétique / lignes de champ / aimants
- Champ magnétique créé par un courant Règle de la main droite
- Champ magnétique au sein d'un solénoide
- Force de Laplace
- Flux magnétique
- Loi de faraday / lenz
- Inductance / relation courant-tension / Energie stockée