

## Tricks généraux

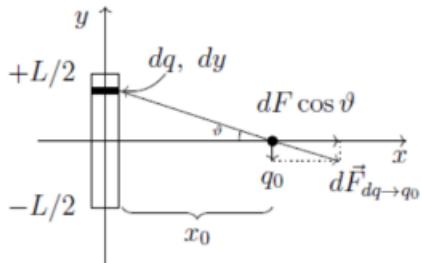
- utiliser le principe de superposition : quand il n'y a pas de charge, on peut dire qu'il y a en fait une charge positive et une négative.
- toujours justifier que le champ est uniforme car la distance entre les plaques est faible et les plaques sont grandes
- $P = \frac{E}{dt}$
- faire des matrices pour les équations loi mailles/noeuds
- dans une trajectoire circulaire, une force de  $\frac{mv^2}{R}$  doit tirer vers le centre (centripète).

## Force électrostatique

$$\vec{F} = k \frac{q_a q_b}{r^2}$$

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$$

Méthode pour calculer la force exercée par la barre sur  $q_0$ .



- écrire l'expression de la force selon un vecteur  $\vec{r}$ .
- ici, on sait que la force sur  $y$  va se compenser, donc on intègre la force selon  $\vec{x}$  pour trouver  $F_{\text{tot}}$ .

Attention, quand on intègre, il ne faut pas oublier de décomposer le vecteur  $\vec{r}$  selon les différentes composantes (qui seront dans le calcul de l'intégrale !) :

$$\vec{r} = \frac{D_1 \vec{e}_r + D_2 \vec{e}_z}{\sqrt{D_1^2 + D_2^2}}$$

## Dipôle électrique

Moment dipolaire :  $\vec{p} = q\vec{d}$ , décrit la séparation des charges

La force sur un dipôle dans un champ électrique  $E$  (externe):  $\vec{F} = (\vec{p} \cdot \vec{\nabla}) \vec{E}$

Moment de force :  $\vec{\tau} = \vec{r} \times \vec{F}$ , permet de décrire la rotation du dipôle (une fois que le dipôle est parallèle à  $E$ , le moment de force devient nul).

Théorème du moment cinétique :  $\vec{\tau} = \frac{dL_O}{dt}$

$$\vec{L}_O = \sum_i \vec{r}_i \times m_i \vec{v}_i$$

## Champ électrique

Dans le cas d'un champ uniforme :  $E = \frac{V}{L}$ .

Seule la direction importe, le sens sera apporté par la charge sur laquelle on "appliquera" le champ.

Quand on a une surface avec une forme facile (symétrique) on peut utiliser Gauss :

$$\Phi_E = \int \overrightarrow{E(r)} \cdot d\vec{S} = \frac{Q_{\text{int}}}{\epsilon_0}$$

En fait on va entourer nos charges avec une forme (par exemple une sphère), donc on aura  $Q_{\text{int}}$  et on va calculer  $d\vec{S}$  est toujours orthogonal à la surface par laquelle les charges passent (donc si le champ est dans le même sens alors le produit scalaire fera 1).

Dans le cas d'un condensateur plan :  $E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0}$ .

## Potentiel électrique

Ce n'est pas un vecteur. C'est comparable à la hauteur en méca.

$$E = -\nabla V \Leftrightarrow V = \int E d\vec{l}$$

On en déduit :

Comment calculer  $V$  **en un point** ? Charge(s) ponctuelle(s) :

$$V(r) = \sum_i^n k \frac{Q_i}{r_i}$$

Pour une surface avec une distribution de charges continue :

$$V(r) = \int_S k \frac{d_q}{r}$$

Attention  $V$  est un scalaire, pas un vecteur !

TODO clarify avec Valerio : Si dans un circuit on a une différence de potentiel entre la borne + d'une résistance et la borne -, on sait qu'elle augmente/diminue linéairement (le champ est constant).

## Conservation de l'énergie

$$E = K + U$$

L'énergie cinétique et l'énergie potentielle d'une charge  $q$  dans un potentiel électrique  $V$  créé par d'autres charges :

$$K = \frac{1}{2}mv^2$$

$$U = V \cdot q$$

dans un circuit on considère que la vitesse est nulle dans un conducteur donc :

$$P = \frac{E}{dt} = \frac{dU}{dt} = V \cdot i$$

$U$  s'exprime toujours comme une énergie potentielle entre une charge et une ou plusieurs autres charges.

En méca, l'énergie potentielle dépend du champ dans lequel la charge est introduite (en méca  $U = mgh$ ). En électromag pareil, elle dépend des autres charges présentes autour.

L'énergie potentielle est définie à une constante près. En méca on dit que  $U(\text{surface de la Terre}) = 0$  pour simplifier les calculs. En électromag on dit  $U(\infty) = 0$  (quand les deux charges sont éloignées à l'infini alors l'énergie potentielle est nulle).

$$W_{A \rightarrow B} = \Delta U$$

(par exemple en méca  $W_{A \rightarrow B} = mgh_a - mgh_b$ )

Si  $\nabla V = 0$ , le potentiel est constant, ça signifie que le champ est nul dans la direction dans laquelle on effectue le travail, mais on peut avoir un champ perpendiculaire à la direction.

### Puissance dissipée

$$P = R i^2$$

### Propriété des conducteurs dans un cas électrostatique

- $\vec{E} = 0$  à l'intérieur
- à l'intérieur ce n'est pas chargé (il y a un équilibre)
- $\vec{E}$  est  $\perp$ , car c'est à la surface que toutes les charges se trouvent (et toute composante du champ parallèle ferait bouger les charges, ce qui n'est pas autorisé).

### Formule de Poisson

On part de la formule de Gauss:

$$\int_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{Q_{\text{int}}}{\epsilon_0}$$

Intégrer sur la surface c'est comme intégrer sur le volume en dérivant le vecteur :

$$\Leftrightarrow \int_V \vec{\nabla} \cdot \vec{E} \cdot dV = \frac{Q_{\text{int}}}{\epsilon_0}$$

On retrouve la charge :

$$\Leftrightarrow \vec{\nabla} \cdot \vec{E} \int_V dV = \frac{1}{\epsilon_0} \int_V \rho \cdot dV$$

$$\Leftrightarrow \vec{\nabla} \cdot \vec{E} \int_V dV = \frac{\rho}{\epsilon_0} \int_V dV$$

$$\Leftrightarrow \vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

$$\Leftrightarrow \vec{\nabla}^2 \cdot \vec{V} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

### Capacité

Dans le cas d'un condensateur,  $Q = C \cdot V$

Ou  $Q = \frac{C}{\Delta V}$  pour un condensateur, avec  $\Delta V$  la différence de potentiel entre les deux plaques.

$$C = \frac{\epsilon A}{d}$$

plus exactement :

$$C = \frac{\epsilon K_f A}{d}$$

donc C ne dépend que de la géométrie du condensateur

$d$  distance entre les plaques (en mètres)

$A$  l'aire des plaques (en mètres carrés)

$\epsilon$  permissivité du milieu entre les plaques (la capacité ne dépend donc pas uniquement de la géométrie mais aussi du facteur  $\chi_i$  du matériau)

$$E = \frac{E_0}{K}$$

$E_0$  le champ électrique si on était dans l'air

$K$  la constante diélectrique du milieu

Calculer une différence de potentiel avec différents milieux:

$$\begin{aligned} V(A) - V(B) &= \int_0^{\text{fin du milieu A}} \vec{E} d\vec{l} + \int_{\text{fin du milieu A}}^{\text{fin du milieu B}} \vec{E} d\vec{l} \\ \Leftrightarrow V(A) - V(B) &= \frac{E_0}{K_{A(d_A)}} + \frac{E_0}{K_{B(d_B)}} \end{aligned}$$

Calculer la capacité des condensateurs en série :

$$\frac{1}{C_{\text{tot}}} = \sum_{\text{capacité du condensateur i}} \frac{1}{C_i}$$

Calculer la capacité des condensateurs en parallèle :

$$C_{\text{tot}} = \sum_{\text{capacité du condensateur i}} C_i$$

## Circuits

La tension va généralement du - au + d'un générateur.

### Règle des noeuds (pour un noeud donné)

$$\begin{aligned} \sum_k i_k &= 0 \\ \sum_n i_{\text{in}} &= \sum_n i_{\text{out}} \end{aligned}$$

### Règle des mailles (autour de chaque maille fermée)

$$\sum_k \Delta V_k = 0$$

On choisit un sens pour compter.

On ajoute les tensions (de batterie par exemple) dans le sens dans lequel on va.

On ajoute les résistances et les inductances comme  $\pm i_k \cdot R_k \Omega$  en fonction du sens (si on compte dans le sens opposé au courant, on ajoute, sinon on enlève). donc le + des résistances est le - des tensions de batteries

### Loi d'ohm

$V = Ri$  (elle s'applique aux bornes d'un dipôle)

### Charger un condensateur

temps caractéristique d'un condensateur  $\tau = RC$ .

On a qu'à l'état d'équilibre (quand le condensateur est chargé), le courant est nul :

$$CV = q \Rightarrow C \frac{dV}{dt} = \frac{dq}{dt} = i$$

$$\text{donc } i = C \frac{dq}{dt}$$

- partir de la loi  $V_c$  (le générateur) +  $V_r$  (la tension générée par la résistance du condensateur) = 0.

$$V_c + RC \frac{dV}{dt} = 0$$

$$\frac{Q}{RC} = \frac{dV}{dt}$$

Résoudre.

### Charge

$$V_{C(t)} = \varepsilon \left( 1 - \exp\left(-\frac{t}{RC}\right) \right)$$

### Décharge

$$V_{C(t)} = \varepsilon \exp\left(-\frac{t}{RC}\right)$$

### Champ magnétique

le champ créé par un objet c'est comme  $\omega$  (le vecteur rotation), ça dit dans quel sens ça tourne, pas vers quoi l'objet est attiré

### Unités

$\vec{B}$  en Tesla (T)

Gauss  $\equiv 10^{-4} T$

Si on a un courant  $i$  dans un fil de longueur  $L$  et un champ magnétique  $B$ . La force est perpendiculaire au courant **et** au champ.

$$\overrightarrow{F_B} = i \vec{L} \times \vec{B}$$

$$= \frac{dq}{dt} d\vec{l} \times \vec{B}$$

$$= (dq) \vec{v} \times \vec{B}$$

La force de Lorentz ne change pas la norme du vecteur vitesse mais la direction (pas de travail).

$$\overrightarrow{F_{\text{Lorentz}}} = q \vec{v} \times \vec{B}$$

Dans une trajectoire circulaire d'une charge de masse  $m$ :

$$\frac{mv^2}{r} = qvB$$

donc :

$$R = \frac{mv}{qB} \text{ et freq} = \frac{1}{T} = \frac{v}{2\pi r} = \frac{qB}{2\pi m}$$

$$\omega = 2\pi f$$

à distance  $r$  d'une charge, on a le champ magnétique

$$\overrightarrow{B(r)} = \frac{\mu_0}{4\pi} q \frac{\vec{v} \times \vec{r}}{r^2}$$

$\mu_0 = 4\pi 10^{-2}$  (en Tm/A).

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} i \frac{d\vec{l} \times \vec{r}}{r^2}$$

$$B_{\text{tot}} = \int_{-L}^{+L} dB$$

Norme du champ magnétique à distance  $x$  du fil :

$$B = \frac{\mu_0 i}{2\pi x \sqrt{x^2 + L^2}}$$

Pour  $x \ll L$ :

$$B = \frac{\mu_0 i}{2\pi x}$$

## Loi d'ampère

$$\oint_C \vec{B} d\vec{l} = \mu_0 \sum i_{\text{entourés}}$$

Pour un cercle :

$$B(r) 2\pi r = \mu_0 i$$

## Moment magnétique

décrit la force et l'orientation d'un dipôle magnétique, comme une boucle de courant ou un aimant.

$$\vec{\mu} = i \vec{A}$$

où  $\|\vec{A}\|$  est la surface que le câble entoure et  $\vec{A}$  pointe hors de la surface (comme le vecteur de rotation). Il essaye de s'aligner avec le champ magnétique.

## Couple magnétique

la force de rotation exercée sur un dipôle magnétique placé dans un champ magnétique non uniforme ou incliné.

$$\vec{\tau} = \vec{\mu} \times \vec{B}$$

Le couple magnétique tend à aligner le moment magnétique avec le champ magnétique.

## Loi de Lenz (flux magnétique)

$$\varepsilon = -\frac{d(\Phi_B)}{dt}$$

quand le flux change (la surface par exemple), la force électromotrice doit générer un courant (donc un champ) qui s'oppose à celui qui la génère (donc à la différence de flux magnétique)

$$\Phi_B = \int_S \vec{B} d\vec{A}$$

Si  $B$  est constant sur la surface  $\Phi_B = B \cdot S$ .

## Vitesse angulaire

$$\omega = \frac{2\pi}{T}$$

$$f = \frac{1}{T}$$

## Convertir et déplacer l'énergie

### Transformateurs

$$\frac{\varepsilon_{\text{grand}}}{\varepsilon_{\text{petit}}} = \frac{N_{\text{grand}}}{N_{\text{petit}}}$$

## Inductance

Il faut vraiment voir  $L$  (l'inductance) comme une bobine qui crée un champ magnétique.

$$L = \frac{\Phi_B}{i}$$

force électromotrice :

$$\varepsilon = -\frac{d(\Phi_B)}{dt} = -\frac{d}{dt}iL = -L\frac{di}{dt}$$

## Inductance mutuelle

Quand on met deux bobines à côté l'une de l'autre, le champ magnétique de l'une va influencer l'autre :

$$M_{12} = M_{21} = \frac{\Phi_{B_1}}{i_2}$$

L'énergie stockée dans l'inductance (la bobine) :

$$U_L = \frac{1}{2}Li^2$$

## Circuits RL

Un circuit RL est composé d'une résistance et d'une bobine. Lorsque le courant traverse la bobine, un champ magnétique est créé. Lorsque le courant est interrompu, le champ magnétique diminue jusqu'à zéro. Cela crée une force électromotrice qui s'oppose à la variation du courant.

### Charge

$$i(t) = \left(\frac{v_0}{R}\right) \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\frac{L}{R}}\right)\right)$$

$$V_L(t) = V_0 \exp\left(-\frac{t}{\frac{L}{R}}\right)$$

### Décharge

$$i(t) = \left( \frac{V_0}{R} \right) \exp \left( -\frac{t}{\frac{L}{R}} \right)$$

$$V_L(t) = -V_0 \exp \left( -\frac{t}{\frac{L}{R}} \right)$$

## Circuits AC et impédance complexe

L'impédance c'est une propriété du circuit, comme la résistance. Pour un rapport  $V$  et  $I$  donné, on a une impédance fixe.

$$R_{\text{juste de la résistance}} = \frac{V_{\text{bornes}}}{I_{\text{circuit}}}$$

$$Z_{\text{juste de la résistances}} = R = \frac{V_{\text{bornes}}}{I_{\text{circuit}}}$$

$$Z_{\text{tot}} = \frac{V_{\text{circuit}}}{I_{\text{circuit}}}$$

En fait  $Z$  c'est un peu une généralisation de la résistance pour tout un circuit, qui prend en compte les effets de la capacité et de l'inductance.

On sait que :  $V(t) = V_0(\cos(wt) + i \sin(wt))$  On peut écrire  $V(t) = V_0 \exp(iwt)$

$$\frac{d}{dt} V(t) = iwV(t)$$

$$\frac{d^2}{dt^2} V(t) = -w^2 V(t)$$

Impédance complexe :

$$Z(t) = \frac{V(t)}{I(t)}$$

### Pour la résistance :

$$V - I(t)R = 0$$

$$I(t) = \frac{V(t)}{R}$$

$$Z_R(t) = \frac{V(t)}{I(t)} = \frac{V(t)}{\frac{V(t)}{R}} = R$$

### Pour la capacité :

$$I(t) = \frac{dQ(t)}{dt} = \frac{d(CV(t))}{dt} = C(i\omega V(t))$$

$$Z_C(t) = \frac{V(t)}{C i \omega V(t)} = \frac{1 \cdot i}{i \omega C \cdot i} = -\frac{i}{\omega C}$$

### Pour l'inductance :

$$V(t) - L \frac{dI(t)}{dt} = 0$$

$$I(t) = \frac{V(t)}{i\omega L} = -\frac{iV(t)}{\omega L}$$

$$Z_L(t) = iL\omega$$

**Dans un circuit avec une résistance, une capacité et une inductance :**

$$\begin{aligned} I(t) &= \frac{V(t)}{Z_{\text{tot}}(t)} = \frac{V(t)}{R - \frac{i}{\omega C} + iL\omega} \\ &= \frac{V_0 \exp(i\omega t) \exp(-i\varphi_Z)}{\|Z_{\text{tot}}\|} \end{aligned}$$

$$\|Z_{\text{tot}}\| = \sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}$$

l'impédance totale (en série) est la somme des impédances.

En fonction des conditions initiales on décide si on garde la partie réelle (cos) ou la partie imaginaire (sin). p. ex. s'il n'y a pas de courant initialement, on prend la partie imaginaire.

### Conditions particulières

- quand  $\omega L = \frac{1}{\omega C} = 0$ , résonance,  $I(t) = \frac{V(t)}{R}$

### Courant de déplacement

$$i_D = \epsilon_0 \frac{d}{dt} \epsilon_A \vec{E} \cdot d(\vec{A})$$

### Dernière équation de Maxwell

à revoir, to do

$$\oint_{C \text{ (frontière)}} \vec{B} d\vec{l} = \mu_0 i_{\text{entourés}} + \frac{1}{C^2} \frac{d}{dt} \left( \int \vec{E} d\vec{A} \right)$$

$$\oint_{A \text{ (surface)}} (\vec{\nabla} \times \vec{B}) d\vec{A} = \int \int \mu_o J + \frac{1}{C^2} \frac{d}{dt} \vec{E} d\vec{A}$$

avant :

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J}$$

après avoir ajouté le courant de déplacement :

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \frac{1}{C^2} \frac{d}{dt} \vec{E}$$

TODO on les trouve d'où ces énergies ?

énergie magnétique :

$$U_B = \frac{1}{2\mu_0} \int_V B^2$$

énergie électrique :

$$U_E = \frac{1}{2\varepsilon_0} \int_V E^2$$

TODO :

## Ondes électromagnétiques

$$\frac{\partial^2 E_x}{\partial z^2} = \frac{1}{C^2} \frac{\partial^2 E}{2} (\partial t^2)$$

$$E_{X(z,t)} = g(z - ct) + h(z + ct)$$

La forme de l'onde reste la même :

On veut que  $g(z_1 - ct_1) = g(z_1 + \delta z - c(t_1 + \delta t))$ . On a donc  $\delta z = c\delta t$ .

$$E(z, t) = E_0 \cos(kz - \omega t)$$

Soit  $\lambda$  la longueur d'onde, on a  $\lambda = cT$ .

Numéro d'onde :  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$

### Densité d'énergie dans une onde électromagnétique

Densité des champs électromagnétique :

$$u = \frac{1}{2\mu_0} B^2 + \frac{1}{2} \varepsilon_0 E^2$$

mais dans les ondes électromagnétiques, on a

$$B = \frac{E}{c}$$

, donc :  $u = \varepsilon_0 E^2$

Vecteur de Pointing, indique dans quelle direction se propage l'énergie d'une onde électromagnétique :

$$\vec{S} = \frac{1}{\mu_0} \vec{E} \times \vec{B}$$

$\vec{S}$  mesure le flux instantané d'énergie.

### Longueur d'onde

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

différence entre la vitesse angulaire en rad/s et la fréquence en Hz (cycle par seconde) :

$$\frac{2\omega}{2\pi} = f$$