Chapitre IV
Electrodynamique

L'**électrodynamique** est ………………………………………………………………………
Les particules sont en général des objets microscopiques que l'on peut considérer comme des systèmes mécaniques assimilables à des …………………………… Contrairement aux objets à l'échelle macroscopique très souvent ……………, ces particules peuvent avoir un excès ou un défaut de charges qui les rend sensibles aux forces électriques et magnétiques.

Première (spé)

- Utiliser la loi de Coulomb.
- Citer les analogies entre la loi de Coulomb et la loi d'interaction gravitationnelle.
- Force électrostatique et champ électrostatique.
- Utiliser les expressions vectorielles de la force électrostatique.

Terminale (spé)

- Champ électrique créé par un condensateur plan.
- Mouvement d'une particule chargée dans un champ électrique uniforme.
- Montrer que le mouvement dans un champ uniforme est **plan**.
- Établir et exploiter les équations horaires. Établir l'équation de la trajectoire.
- Discuter de l'influence des grandeurs physiques sur le champ électrique.
- Principe de l'**accélérateur linéaire** de particules chargées.
- Décrire le principe d'un accélérateur linéaire de particules chargées.
- Exploiter la conservation de l'énergie mécanique ou le théorème de l'énergie cinétique.

Grandeurs physiques :

Grandeur physique	Symbole	Unité	Dimension	Apparition
champ électrique			$MLT^{-3}I^{-1}$	1ère, Terminale
champ magnétique			$MT^{-2}I^{-1}$	New!
permittivité du vide			$M^{-1}L^{-3}T^{4}I^{2}$	New!

S.I. : T : temps, L : longueur, M : masse, I : intensité, Θ : température, N : quantité de matière

Salviati : **@Simplicius** Le champ $\vec{E}$ en V.m^{-1} et le champ $\vec{B}$ en T ne sont **pas des forces**. En conséquence, il faut éviter de les compter dans le bilan de forces. Les expressions des forces électrique et magnétique sont page 5 et page 10. (1er rappel)

MATHS

- Gradient, produit vectoriel

I . Force électrostatique

Toutes les charges (systèmes mécaniques) seront donc assimilées à des **points**.

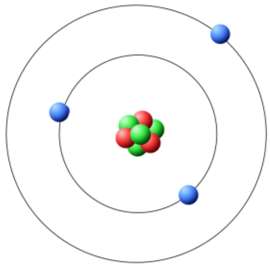
Rappel sur la charge : (Chapitre III ARQS page 3)

La charge q est forcément un multiple de la charge élémentaire e, elle ne peut prendre que des valeurs discrètes, elle est donc ...., le *quantum* étant $e = 1,602.10^{-19}$ C même si en ARQS, on admet que les variations d'un quantum à l'autre sont infimes pour pouvoir considérer une fonction continue du temps $q(t)$.

Elle se mesure en C (Coulomb, Charles-Augustin de son prénom).

C'est une grandeur intrinsèque à un objet chargé, elle vaut :

$q = \pm Ne$ où N est le nombre excédentaires de charges.



atome de lithium

Soit un atome de Lithium ($Z = 3$) vu de façon classique c'est-à-dire constitué d'un noyau ponctuel de charge q_n, une 1ère orbite avec 2 élecrons de charge q_1 et un électron ponctuel sur une 2ème orbite de charge q.

Toutes les charges sont supposées constantes.

Objectif : Déterminer de façon classique le mouvement de l'électron externe.

Hyp1 : ....
Hyp2 : **On néglige toutes les interactions extérieures au système (interatomiques).**

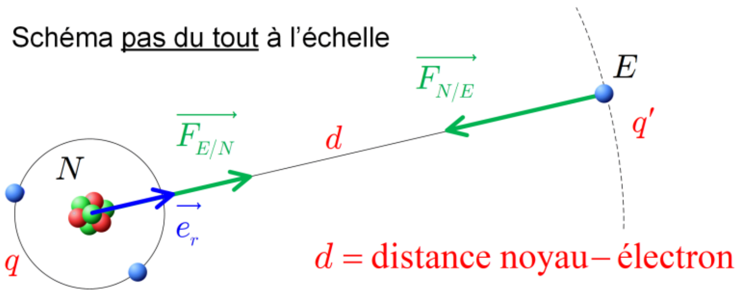
La 1ère hypothèse a pour conséquence que l'électron externe voit un **noyau** .... constitué du noyau et des 2 électrons de centre de masse et de charge, le centre du noyau.

La charge du noyau relatif vaut : $q' =$

A . Loi de Coulomb (1785)

Soit le système {noyau relatif-électron} décrit dans le référentiel terrestre supposé galiléen, le laboratoire ; on assimile les objets à leurs centres : le noyau relatif au point N, l'électron au point E. On se place dans le vide de .... :

$$\varepsilon_0 = 8,854.10^{-12}\ \mathrm{F.m^{-1}}$$



1 . Expression des forces

D'après la 3ème loi de Newton, $\overrightarrow{F_{E/N}} = -\overrightarrow{F_{N/E}}$. Ce sont des forces ....

Dans un repère **sphérique** ayant pour origine le noyau, la loi de Coulomb donne :

$\boxed{\overrightarrow{F_{N/E}} = \qquad\qquad\qquad}$ avec $r = d \approx 145\,\text{pm} = 1,45.10^{-10}\ \text{m}$ pour le lithium

Dans l'exemple du lithium, $q = \ldots\ldots, q' = \ldots\ldots$ donc $\overrightarrow{F_{N/E}} = -\overrightarrow{F_{E/N}} =$ avec $qq' < 0$.

La force $\overrightarrow{F_{N/E}}$ est bien dirigée selon ……… , elle est ………………, les charges ………………
Ces particules ayant une masse, elles sont aussi soumises aux forces de gravitation :

$\overrightarrow{F'_{N/E}} = -\overrightarrow{F'_{E/N}} =$ avec $r = d \approx 145\,\text{pm} = 1,45.10^{-10}\ \text{m}$ (force centripète aussi).

Avec $m' =$ $\approx 1{,}15.10^{-26}$ kg où E_{coh} est l'énergie de cohésion nucléaire.

2 . Ordres de grandeur

Il vaut se souvenir que $\boxed{\dfrac{1}{4\pi\varepsilon_0} \approx 9.10^9\ \text{m}.\text{F}^{-1}}$ $\Leftrightarrow$ $\varepsilon_0 \approx \dfrac{\cdots}{\ldots\ldots\ldots\ldots}\ \text{F}.\text{m}^{-1}$

La norme de la force électrostatique vaut : $\left\|\overrightarrow{F_{N/E}}\right\| = 9.10^9 \times \dfrac{(\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ )^2}{(\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ )^2} \approx$ ………… N.

La norme de la force gravitationnelle vaut :

$\left\|\overrightarrow{F'_{N/E}}\right\| = 6,67.10^{-11} \times \dfrac{\ldots\ldots\ldots\ldots \times \ldots\ldots\ldots\ldots}{(\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ )^2} \approx$ ………… N donc $\left\|\overrightarrow{F'_{N/E}}\right\| \qquad \left\|\overrightarrow{F_{N/E}}\right\|$

A l'échelle **microscopique**, les forces gravitationnelles sont négligeables de … ordres de grandeurs aux forces électrostatiques. En effet, par analogie entre les expressions des forces, les masses des particules sont de l'ordre de $10^{\cdots\cdots}$ kg donc extrêmement faibles comparées aux charges de l'ordre de $10^{\cdots\cdots}$C. De plus, les constantes G et $(4\pi\varepsilon_0)^{-1}$ diffèrent de … ordres de grandeur. ……………………………, on retrouve les … ordres de grandeur.

A l'échelle **macroscopique**, les charges sont nulles car les systèmes sont neutres donc les forces gravitationnelles deviennent perceptibles mais à l'échelle des **……………** (10^{+20} kg).

Dans le cas où les charges seraient **de même signe**, on aurait qq'

Donc $\overrightarrow{F_{N/E}}$ serait dirigée selon ……… et donc $\overrightarrow{F_{E/N}}$ selon ………

C'est une grande différence avec les forces de gravitation, les charges peuvent ……………… contrairement aux masses m, m' forcément positives qui ne peuvent que s'attirer.

B . Energie potentielle électrique E_{PE}

1)

Par identification :

2) Par identification :

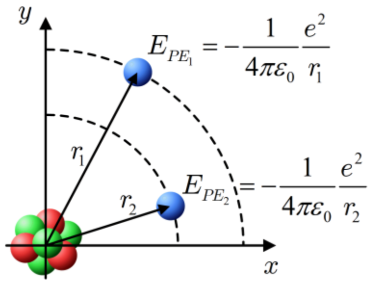
3) Il est logique de penser que loin du noyau, l'attraction n'a plus d'effet sur l'électron donc on choisit comme condition limite : .... $=\ldots$ L'expression donne $E_{PE}=\ldots$

Donc $C=\ldots$ et $\boxed{E_{PE} = \quad}$ (coordonnées cylindriques, annulation à l'infini)

Si l'électron passe d'une orbite de rayon r_1 à une orbite de rayon $r_2 < r_1$, alors :

$\Delta E_{PE} =$ (TEP)

$=$ car $r_2 < r_1$



En inversant $_1$ et $_2$, on montre facilement que :

$W_{12}\left(\overrightarrow{F_{N/E}}\right)+W_{21}\left(\overrightarrow{F_{N/E}}\right)=0$ donc la force électrostatique est bien ....

Analogies gravitation / électrostatique :

gravitation	**électrostatique**
Newton (1687)	Coulomb (1785)
distance : r (ou d)	distance : r (ou d)
masses : m, m'	
	constante : $+\dfrac{1}{4\pi\varepsilon_0}$
énergie potentielle : $E_{PG} = -G\dfrac{mm'}{r}$	énergie potentielle : $E_{PE} =$
force : $\overrightarrow{F'_{N/E}} =$	force : $\overrightarrow{F_{N/E}} =$

champ de pesanteur : $\vec{g} =$	champ électrique : $\vec{E} =$
poids : $\vec{\dots} = \dots\dots\ \vec{\dots}$	force de Coulomb : $\vec{\dots} = \dots\ \vec{\dots}$

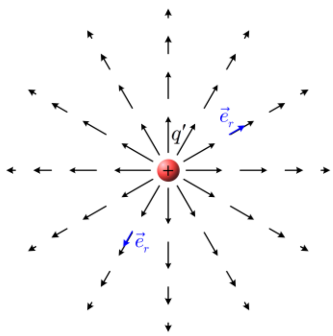
On peut définir un **champ électrique** $\vec{E}$ par analogie avec le champ de pesanteur $\vec{g}$.
Comme toute masse crée un champ de pesanteur, toute charge crée un **champ électrique** $\vec{E}$ qui attire ou repousse les autres charges à proximité soumises à une force $\vec{F} =$

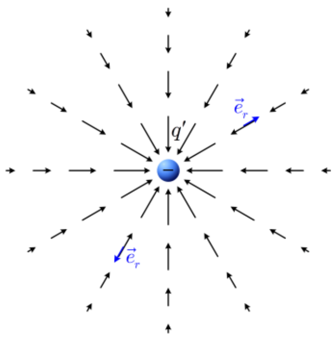
C . Champ électrostatique

Lorsque la charge q' ne dépend pas du temps, on parle de champ **électrostatique**, champ électrique .... On parle aussi de champ électrique ....

- Si la charge $q' > 0$, alors $\vec{E}$ est selon ....
- Si la charge $q' < 0$, alors $\vec{E}$ est selon ....

Il dépend de la coordonnée spatiale r, il n'est donc pas ....
Même si $r = cste$, il n'est pas **constant** car ....





1 . Champ uniforme constant

Comment créer un champ électrique constant ?
Un condensateur n'est pas juste un composant électronique.
En régime permanent, on peut accumuler des charges sur ses armatures, ces charges vont créer un champ électrique :

On admet que le champ électrique est constant dans le condensateur : (théorème de Gauss)

$\vec{E} =$ avec E la coordonnée du champ électrique

L'équation de Maxwell-Gauss montre en électrostatique que le champ électrique dérive du potentiel électrique : $\boxed{}$ Pour le condensateur plan, puisque $\vec{E} = \overrightarrow{cste} = E\,\vec{e}_z$:

$\vec{E} =$ et par identification : $\boxed{E = }$

U est la tension du générateur et d la distance entre les armatures *i.e.* l'épaisseur du diélectrique, l'isolant présent entre les armatures constituant le condensateur.

1) Analyse dimensionnelle avec le gradient :

$$\left[\vec{E}\right]=\left[-\overrightarrow{grad}\,V\right]=$$

2) Analyse dimensionnelle avec la permittivité :

$$q=Cu \quad\Rightarrow\quad [Q]=[C][U] \quad\Leftrightarrow\quad [C]=[Q]/[U]$$

$$\left[\vec{E}\right]=$$

3) Analyse dimensionnelle avec la force et l'énergie :

$$\vec{F}=q\vec{E},\ \delta W=\vec{F}.d\overrightarrow{OM}=\mathcal{P}\,dt,\ p(t)=u(t)\times i(t)$$

$$\left[\vec{E}\right]=$$

Un champ électrique s'exprime donc **en ....** ("........................")

2 . Mouvement à vecteur-accélération constant

La force à laquelle peut être soumis une charge q dans un condensateur peut s'écrire :

$$\vec{F}= \qquad\qquad\qquad \text{avec } U>0$$

Hypothèse : **On suppose que la charge n'est soumise qu'à la force électrique.**

Si $q>0$, la force électrique $\vec{F}$ est selon ....

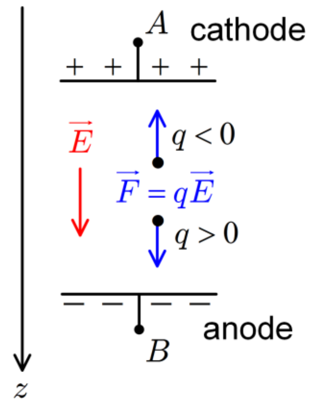
La charge sera entraînée vers ....

Si $q<0$, la force électrique $\vec{F}$ est selon ....

La charge sera entraînée vers ....

La 2ème loi de Newton s'écrit :

...



Le mouvement d'une charge q de masse m dans un champ électrique **uniforme** constant est donc un ....

Le mouvement sera donc .... ou .... et la position de la charge s'écrit :

$$\boxed{\overrightarrow{OM}(t)= \qquad\qquad\qquad\qquad} \quad \text{(chapitre I pages 6 à 8)}$$

où $\vec{v}_0$ est la vitesse initiale de la charge et $\overrightarrow{OM_0}$ sa position initiale

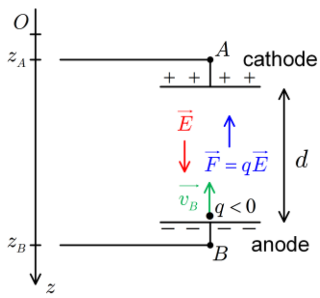
Salviati : Dans les exercices, on déduit l'accélération de la 2ème loi de Newton puis on remonte par intégration aux équations horaires de la position, cette relation encadrée paraît sympathique mais il faut mieux ne pas l'utiliser au risque de faire des erreurs.

3 . Approche énergétique

L'utilisation de champ électrique pour mettre en mouvement des particules possède des applications en médecine pour la radiothérapie contre le cancer. Il est aussi utilisé dans les accélérateurs linéaires comme le SLAC fondé en 1962 à Stanford (USA). Le SLAC est le plus grand accélérateur linéaire du monde, il est long de 3,2 km. La différence de potentiel imposée de 200 MV permet aux particules d'atteindre des énergies de ....

Données pour l'électron : $e = 1,602.10^{-19}$ C, $m = 9,109.10^{-31}$ kg

On considère un électron de charge $q = -e < 0$ en mouvement rectiligne allant de l'anode (B) à la cathode (A) sous l'effet d'un champ constant $\vec{E}$. On cherche sa vitesse $\overrightarrow{v_A}$ atteinte en A.



On remarque que $\vec{F} =$ car $q = cste$

Or la force électrostatique est conservative donc $\vec{F} =$. Par identification :

$$\boxed{\quad\quad\quad}$$

(charge constante q dans un condensateur de tension constante U)

La linéarité qui apparait ici entre .... et le .... explique leurs noms si proches, c'est vers 1850 qu'on commence à ne plus les confondre.

Le TEP donne de B vers A :

$1\text{eV} = 1{,}602.10^{-19}\,\text{J}$, 1 électron-Volt vaut ……………………………………………………………

Pour un électron et uniquement pour un électron : $W_{BA} =$

Le travail apporté par le condensateur en eV est **……………………………** égal à ………….. ……………………… D'après la mécanique de Newton, le SLAC qui impose une tension de 200 MV va apporter un travail de ………… à un électron. C'est tout l'intérêt de l'unité **eV**.

Sagredo : Mais les particules du SLAC peuvent atteindre 50 GeV, où est l'erreur ?
Salviati : L'erreur vient de la modélisation simplifiée du SLAC par un simple condensateur et du fait que la vitesse atteinte par les particules dans cet accélérateur est suffisamment proche de la lumière pour considérer la mécanique Newtonienne comme fausse.

Le TEC donne :

Application numérique : $U = 2{,}0\,\text{V}$, sans vitesse initiale, $v_A \approx$ ………..m.s^{-1} (déjà élevée…)

➢ Si $U > 0$, $\vec{E}$ et $\vec{v_B}$ sont ……………………, v_A v_B, l'électron est **……………………**

Pour une particule de charge positive $q > 0$:

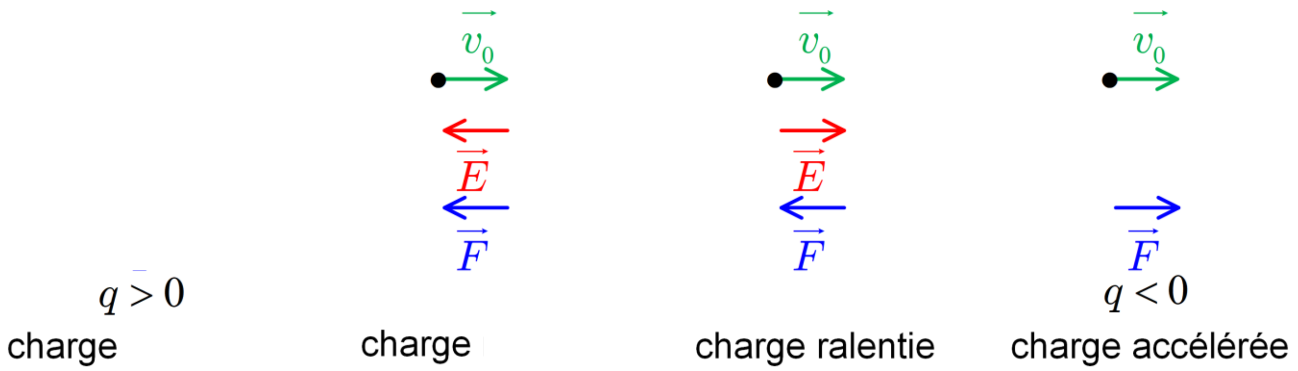
Si $U > 0$, $W_{BA} = -qU$ 0, le travail serait **…………………**, la particule serait **………………**

Un champ électrostatique **opposé au mouvement** accélère ………………………………… ………………………………………………………………………………………………

➢ Si $U < 0$, $\vec{E}$ et $\vec{v_B}$ sont ………………………, v_A v_B, l'électron est **…………………**

Pour une particule de charge positive $q > 0$:

Si $U < 0$, $W_{BA} = -qU$ 0, le travail serait **………………**, la particule serait **…………………**



Un champ électrostatique dans le sens du mouvement accélère …………………… ……………………………………………………………………………………………………

Salviati : Plus simplement, la force électrique doit être dans le même sens que la vitesse initiale pour pouvoir accélérer la particule sinon la particule est ralentie.

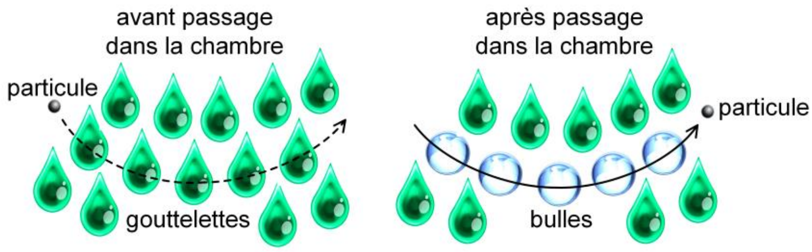
II . Force magnétostatique

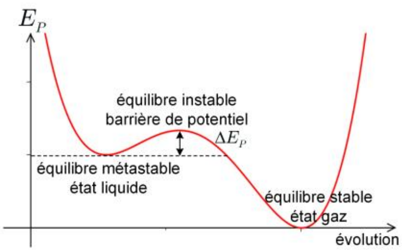
La possibilité d'accélérer les particules est intéressante car à haute énergie cinétique, les phénomènes de …………………… et …………………… de particules sont plus importants. Mais cela n'a pas d'intérêt si on ne peut pas les détecter et mesurer leurs caractéristiques.

A . Trajectoire des particules

La **chambre à bulles** est un détecteur de particules inventé en 1952 par Glaser (prix Nobel en 1960 pour cette invention). Son principe est de contenir un liquide proche de sa température d'ébullition. Lorsqu'une particule va traverser le liquide, elle va fournir une partie de son énergie aux gouttelettes présentes sur sa trajectoire, cette énergie cédée aux gouttelettes va leur permettre de se vaporiser sous forme de gaz.

La chambre à bulles.mkv

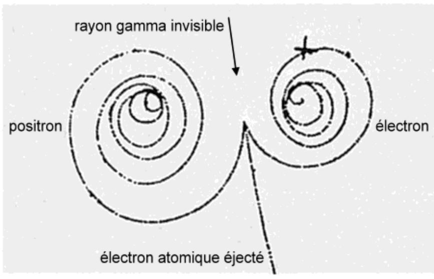




On suppose que l'énergie potentielle d'une gouttelette peut être décrite selon la courbe ci-contre. A $T \approx T_{éb}$, la gouttelette est en équilibre ………………… (minimum relatif). Lorsque la particule passe à proximité de la gouttelette, elle lui fournit une énergie ΔE_P suffisante pour franchir la ………………………… et atteindre l'équilibre ………… (minimum absolu).

Pour différencier les particules, on applique en plus dans la chambre à bulles, **un champ ……………………………… noté** $\vec{B}$ *i.e.* un champ magnétique indépendant du temps.

Ci-contre, un photon γ, invisible dans la chambre à bulles car les bulles ne réagissent qu'à la matière chargée, s'est matérialisé en un électron e^- et un **positron** e^+. Un positron est une ………………………………… identique à un électron (même masse, même spin) mais avec une charge positive : $\gamma \rightarrow e^+ + e^-$.



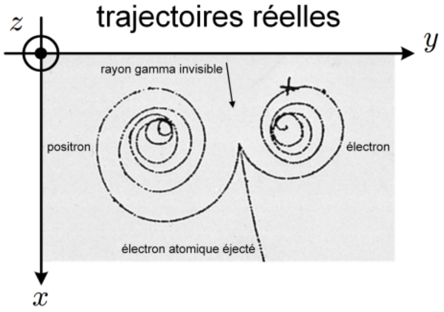
C'est le champ magnétique $\vec{B}$ qui est responsable de l'allure ……………… des trajectoires.

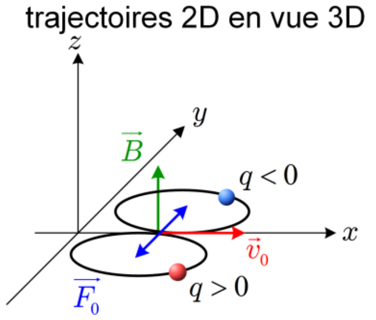
B . Champ magnétostatique

Soit un référentiel terrestre supposé galiléen dans lequel on choisit un repère $Oxyz$.

On définit le plan xOy comme le plan dans lequel se trouve la trajectoire des particules.

Le champ magnétique est orthogonal au plan : $\vec{B} = B\,\vec{e_z} = \overrightarrow{cste}$:





Au lieu de représenter le problème à 3D, on peut rester à 2D en représentant les vecteurs :

- par le symbole $\odot$, pointe de flèche, qui indique le sens "sortant", vers l'extérieur.
- par le symbole $\otimes$, queue de flèche, qui indique le sens "entrant", vers l'intérieur.

La force magnétique $\vec{F}$ apparaît comme une force ...., elle dépend de la charge q car l'électron et le positron ne vont pas dans la même direction. Elle dépend aussi du vecteur-vitesse $\vec{v}$ et du champ magnétique $\vec{B}$ en sens et en direction car $\vec{F}$ est .... à $\vec{v}$ et à $\vec{B}$ donc au plan $(\vec{v},\vec{B})$ à tout instant.

➢ Lorsqu'on fait tourner $\vec{v}$ vers $\vec{B}$ **avec sa main droite**, on obtient la .... et le .... de la force magnétostatique $\vec{F}$ pour le **positron**. La force $\vec{F}$ forme donc un .... avec le couple de vecteurs $(\vec{v},\vec{B})$ lorsque la charge q est **positive**.

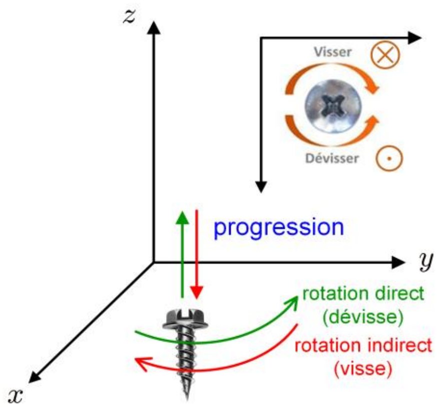
➢ Soit l'angle $(\vec{v},\vec{B})$, donc orienté de $\vec{v}$ vers $\vec{B}$.

La force sera **maximale** lorsque $(\vec{v},\vec{B}) = \dfrac{\pi}{2}$: $\|\vec{F}\| =$

La force sera **nulle** lorsque $(\vec{v},\vec{B}) = 0$ *i.e.* si $\vec{v} // \vec{B}$: $\|\vec{F}\| = 0$

Ce comportement ressemble à celui d'un sinus qui est maximal en $\pi/2$ avec $\sin(\pi/2) = 1$ et nul avec $\sin(0) = 0$.

La **norme** de la force vaut donc : $\|\vec{F}\| =$



La force magnétique a les propriétés en direction, en sens et norme d'un produit vectoriel.

La force magnétique est le produit vectoriel entre le vecteur-vitesse et le champ magnétique multiplié par la charge : ...=...........

➢ ***direction :*** ....

➢ ***sens :*** ....

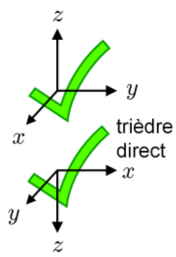
➢ ***norme :*** ....

C . Un point sur le produit vectoriel

Salviati : **@Simplicius** Le symbole du produit vectoriel **n'est pas** un accent circonflexe, il est donc inutile de le mettre en exposant, le mettre sur la ligne, c'est très bien.

Le produit vectoriel n'est pas commutatif, il est **anticommutatif** : ....=...........

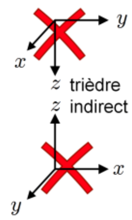
opération (inversion)	**commutatif**
multiplication (chiffres indiens)	$8\times\sqrt{9}=\sqrt{9}\times 8\,(=\ldots\ldots)$
multiplication (lettres grecques)	$\omega T = T\omega\,(=\ldots\ldots)$
addition (lettres + chiffres)	$e^{i\pi}+1=1+e^{i\pi}\,(=\ldots)$
produit scalaire (vecteurs)	$\vec{F}.\vec{v}=\vec{v}.\vec{F}\,(=\ldots)$
opération (inversion)	**anticommutatif**
longueurs algébriques (points)	$\overline{OF'}=\ldots\ldots\ldots(=\ldots\ldots)$
vecteurs (points)	$\overrightarrow{OM}=\ldots\ldots\ldots(=\ldots)$
intégrale (bornes)	$\int_{t_A}^{t_B}\mathcal{P}(t)\,dt= \qquad (=\ldots\ldots)$
produit vectoriel (vecteurs)	$q\vec{v}\wedge\vec{B}= \qquad (=\ldots\ldots)$



On peut le montrer dans un repère cartésien $(O,\vec{e_x},\vec{e_y},\vec{e_z})$.

Par analogie à la force magnétique : le produit vectoriel $\vec{e_x}\wedge\vec{e_y}$ est :

- *direction :* orthogonale au plan formé par $\vec{e_x}$ et $\vec{e_y}$ donc ....
- *sens :* tel que $(\vec{e_x},\vec{e_y},\vec{e_x}\wedge\vec{e_y})$ forme un trièdre **direct** donc ....
- *norme :* $\|\vec{e_x}\wedge\vec{e_y}\|=\underbrace{\|\vec{e_x}\|}_{=1}\underbrace{\|\vec{e_y}\|}_{=1}\underbrace{|\sin(\vec{e_x},\vec{e_y})|}_{=1}=1$ où $(\vec{e_x},\vec{e_y})=\pi/2$, on en déduit $\boxed{\vec{e_{\ldots}}\wedge\vec{e_{\ldots}}=\vec{e_{\ldots}}}$



Par analogie à la force magnétique : le produit vectoriel $\vec{e_y}\wedge\vec{e_x}$ est :

- *direction :* ....
- *sens :* ....
- *norme :* ...., on en déduit $\boxed{\vec{e_{\ldots}}\wedge\vec{e_{\ldots}}=-\vec{e_{\ldots}}}$

On montre aussi que $\vec{e_{\ldots}}\wedge\vec{e_{\ldots}}=\vec{e_{\ldots}}$ et $\vec{e_{\ldots}}\wedge\vec{e_{\ldots}}=\vec{e_{\ldots}}$ (permutation circulaire des lettres xyzxyz).

Dans la base cylindrique, la permutation fonctionne aussi : ....=...... ; ....=......

Dans la base de Frenet :	dans le sens trigonométrique, ...	
	dans le sens horaire, ...	

La permutation circulaire TNzTNz donne alors : ....=...... (sens trigonométrique).

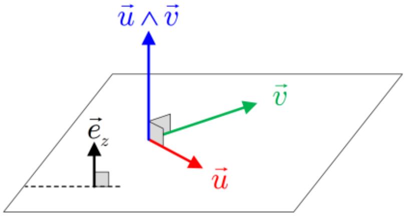
Le produit scalaire $\vec{u}.\vec{v}$ est un ...., le produit vectoriel $\vec{u}\wedge\vec{v}$ est un ....

➢ Colinéarité et orthogonalité lié aux produits :

$\vec{v}\wedge\vec{v}$ est tel que $\left\|\vec{v}\wedge\vec{v}\right\|=$ car $\left(\vec{v},\vec{v}\right)=0$ donc ......=... ou ....=...

Si $\vec{u}\perp\vec{v}$, $\vec{u}.\vec{v}=\ldots$ alors que $\left\|\vec{u}\wedge\vec{v}\right\|=$

Si $\vec{u}\,//\,\vec{v}$, $\vec{u}\wedge\vec{v}=\ldots$ alors que $\vec{u}.\vec{v}=$



➢ Coordonnée d'un produit vectoriel unidirectionnel :

On pose que $\vec{u}\wedge\vec{v}=\left(\vec{u}\wedge\vec{v}\right)_z\vec{e_z}$ où $\left(\vec{u}\wedge\vec{v}\right)_z$ est la coordonnée du produit vectoriel selon $\vec{e_z}$

Par définition (chapitre I page 16), $\left(\vec{u}\wedge\vec{v}\right)_z=$

En développant la norme : $\left(\vec{u}\wedge\vec{v}\right)_z=$

Si $\left(\vec{u}\wedge\vec{v}\right)_z>0$ alors $\left(\vec{u}\wedge\vec{v},\vec{e_z}\right)=\ldots$ et $\left(\vec{u},\vec{v}\right)$ 0, $\left(\vec{u}\wedge\vec{v}\right)_z=$

Si $\left(\vec{u}\wedge\vec{v}\right)_z<0$ alors $\left(\vec{u}\wedge\vec{v},\vec{e_z}\right)=\ldots$ et $\left(\vec{u},\vec{v}\right)$ 0, $\left(\vec{u}\wedge\vec{v}\right)_z=$

$\forall\vec{u},\vec{v}$, $\left\|\vec{u}\wedge\vec{v}\right\|=\left\|\vec{u}\right\|\left\|\vec{v}\right\|\left|\sin\left(\vec{u},\vec{v}\right)\right|$ et $\boxed{\left(\vec{u}\wedge\vec{v}\right)_z=\qquad\qquad}$ sans la valeur absolue.

➢ Distributivité du produit vectoriel :

On suppose que la vitesse est quelconque : $\vec{v}=v_x\vec{e_x}+v_y\vec{e_y}+v_z\vec{e_z}$ et le champ magnétique aussi : $\vec{B}=B_x\vec{e_x}+B_y\vec{e_y}+B_z\vec{e_z}$ alors : $\vec{v}\wedge\vec{B}=($

En développant les 9 termes et en utilisant les produits vectoriels des vecteurs unitaires de la base $\left(\vec{e_x},\vec{e_y},\vec{e_z}\right)$ pris deux à deux : $\vec{v}\wedge\vec{B}=\Bigg|$ (TD4 Ex6)

Produit vectoriel.mp4

La méthode de calcul consiste à rayer les lignes pour les réécrire en dessous des autres puis à faire la **différence** du produit des diagonales pour trouver le résultat.

D . Mouvement des particules

1 . Ordres de grandeur

➢ Analyse dimensionnelle en utilisant la force : $[B]=$

Le champ magnétique se mesure en **T** ("Tesla") où 1 T correspond à ....

➢ Ordre de grandeurs du champ magnétique :

champ magnétique terrestre	
facules solaires (zones plus lumineuses de la photosphère)	
tâches solaires (zones d'éruption de boucle magnétique)	
aimants permanents	
Médicine IRM (électro-aimants)	
Spectroscopie RMN (bobines supraconductrices pour les hauts champs)	

Données pour l'électron : $e = 1{,}602.10^{-19}\ \text{C}$, $m = 9{,}109.10^{-31}\ \text{kg}$

Pour un champ magnétique de 0,10 T et un électron de vitesse 10^4 m.s^{-1},

↳ La norme de la force magnétique vaut : $\left\|\overrightarrow{F_B}\right\| =$

Pour un champ électrique de 1,0 V.cm^{-1},

↳ La norme de la force électrique vaut : $\left\|\overrightarrow{F_E}\right\| =$

Pour un électron dans le champ de pesanteur terrestre 9,8 N.kg^{-1},

↳ La norme du poids d'un électron vaut : $\left\|\vec{P}\right\| =$

Le poids d'un électron est .... devant les forces électriques et magnétiques.

2 . Mouvement plan

On considère un électron assimilé à un point M de masse m et de charge $q = -e$ soumis à un champ magnétique $\vec{B} = B\overrightarrow{e_z}$ pour lequel la vitesse initiale s'écrit $\overrightarrow{v_0} = v_0\overrightarrow{e_x}$ avec $v_0 > 0$.

A l'instant initial :

A l'instant initial, la vitesse est dans le plan xOy, en négligeant le poids, la seule force magnétostatique $\overrightarrow{F_0}$ qui va modifier le mouvement de l'électron est ....
La trajectoire de l'électron sera contenue dans le plan xOy donc le mouvement est ....

3 . Mouvement uniforme

On s'intéresse à la puissance de la force magnétique :

$\mathcal{P}\left(\vec{F}\right) =$ car $\vec{F} \perp \vec{v}$ donc la puissance est toujours .... (calcul complet TD4 Ex6)

Par conséquent, on a aussi $W_{AB}\left(\vec{F}\right) =$ donc le travail est toujours **nul**.

La force magnétique .... tout comme la réaction normale d'un support.
Cette force ne dérive donc pas d'une énergie potentielle, elle ne peut pas fournir ou enlever d'énergie au système, ni l'accélérer ou le freiner, ...

D'après le TPC, …

Le mouvement est donc ………………… Un champ magnétostatique ……………
…………………………………………………………………………………………………

4 . Mouvement circulaire

Bilan des forces : poids $\vec{P}$ négligeable, force magnétostatique $\vec{F}$.

A tout instant, dans la base de Frenet : $\vec{v} =$ et $\vec{B} = B\vec{e_z}$ donc :

$\vec{F} =$ car $\vec{e_T} \wedge \vec{e_z} = -\vec{e_N}$ dans le sens trigonométrique (TNzTNz)

2ème loi de Newton : avec $\vec{P}$ négligeable devant $\vec{F}$

Or $\vec{a} =$ (Chapitre I pages 16,17)

Donc $m\vec{a} = q\left(\vec{v} \wedge \vec{B}\right)$ $\Leftrightarrow$

La 1ère équation donne en intégrant :

La 2ème équation donne :

Le rayon du cercle osculateur reste ……………, cela signifie que le mouvement d'un électron uniquement soumis à un champ magnétostatique reste ………………………………

Pour un positron où $q = +e > 0$, son mouvement circulaire est dans le sens horaire donc : $\vec{F} =$

car $\vec{e_T} \wedge \vec{e_z} = +\vec{e_N}$ dans le sens horaire (page 11 TzNTzN)

La force s'écrit exactement de la même façon pour le positron que pour l'électron. Donc on trouvera de la même façon :

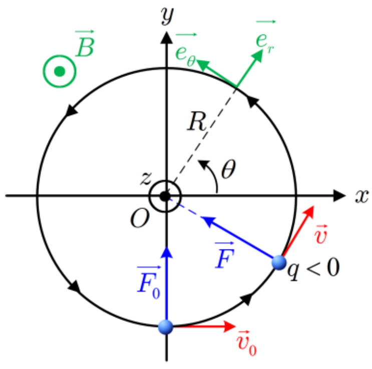
$\boxed{R_c =}$ et de façon générale, $\boxed{R =}$

Ci-contre, les trajectoires des charges en partant de l'origine O :

Pour un électron ou un positron de vitesse 8,4.10^5 m.s^{-1} dans un champ magnétique de 0,10 T, on obtient $R \approx$……… m = … μm.

Salviati : Démontrer que le mouvement est circulaire en coordonnées cartésiennes ou cylindriques est long et difficile, l'intérêt du repère de Frenet prend ici tout son sens.

5 . Mouvement en polaire



On admet que le mouvement est uniforme et circulaire de rayon R et de centre O. Dans ces conditions, $r = cste = R$.

Donc

Force magnétostatique :

(force ………………….)

2ème loi de Newton : $m\vec{a} = \vec{F}$ $\Leftrightarrow$

La 1ère équation donne : dont le signe dépend du signe de la charge.

La 2ème équation donne : $\ddot{\theta} = 0$ car $m \neq 0, R \neq 0$ et en intégrant, $\dot{\theta} = cste$, on le savait déjà.

On procède à une disjonction de cas selon le signe de la charge q en mouvement.

- Si la charge est négative, $q < 0$ alors ……………………, le sens est bien trigonométrique.

Soit … Le mouvement est **uniforme** donc $v = cste = v_0$.

…

- Si la charge est positive, $q > 0$ alors ……………………, le sens est bien horaire.

Soit … Le mouvement est **uniforme** donc $v = cste = v_0$.

…

La durée que met la particule pour faire un tour complet est la période T telle que :

$T =$ ou bien $T = \dfrac{\text{distance}}{\text{vitesse}} =$

Application numérique pour un électron ou un positron dans un champ $B = 0{,}1\,\mathrm{T}$ *:*

Données pour l'électron : $e = 1{,}602.10^{-19}$ C, $m = 9{,}109.10^{-31}$ kg ce qui donne : $T \approx$……… ns

Salviati : **@Simplicius** Le champ $\vec{E}$ en V.m⁻¹ et le champ $\vec{B}$ en T ne sont **pas des forces**. En conséquence, il faut éviter de les compter dans le bilan de forces. Les expressions des forces électrique et magnétique sont page 5 et page 10. (2ème rappel)

III . Force de Lorentz (prix Nobel 1902)

La force de Lorentz est la force à laquelle est soumise une particule dans un champ électromagnétique (uniforme ou non, constant ou non).

Un champ électromagnétique est composé d'un champ électrique $\vec{E}$ et d'un champ magnétique $\vec{B}$. Une particule assimilée à un point M de charge q dans un champ électromagnétique $\left(\vec{E},\vec{B}\right)$ est soumise à la force de Lorentz :

$$\boxed{\phantom{\vec{F}=q\left(\vec{E}+\vec{v}\wedge\vec{B}\right)}} \quad \text{où } \vec{v}=\vec{v}(M)$$

➢ *Domaine électrostatique :*

La force de Lorentz se ramène au **..............................** (charges, circuits simples, etc…)

La charge q est soumise au champ électrostatique $\vec{E}$ donc $\vec{B}=\vec{0}$:

$$\boxed{\phantom{\vec{F}=q\vec{E}}}$$

On parle aussi de **force de Lorentz électrique**.

➢ *Domaine magnétostatique :*

La force de Lorentz se ramène au **..............................** (aimants, ferromagnétisme, etc…)

La charge q est soumise au champ magnétostatique $\vec{B}$ donc $\vec{E}=\vec{0}$:

$$\boxed{\phantom{\vec{F}=q\vec{v}\wedge\vec{B}}} \quad \text{où } \vec{v}=\vec{v}(M)$$

On parle aussi de **force de Lorentz magnétique**.

➢ *Domaine électromagnétique :*

Lorsque la particule est soumise aux deux champs, on se trouve dans un **cas général** où la particule peut être accélérée, ralentie et déviée par un champ électromagnétique (optique ondulatoire, moteurs synchrones/asynchrones, accélérateurs circulaires, etc…).

On peut donc contrôler complètement la trajectoire d'une particule.

Table des matières