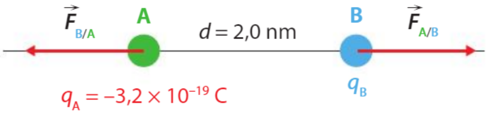
INTERACTIONS - FORCES ET CHAMPS

6 Calculer une charge

| Extraire et organiser l'information.

Les forces d'interaction électrostatique entre les particules schématisées ci-dessous ont pour valeur :

$$F_{A/B} = F_{B/A} = 4{,}60 \times 10^{-10}\ \text{N}$$



1. Quel est le signe de la charge placée en B ?

2. Calculer cette charge.

Donnée

- $k = 9{,}0 \times 10^{9}\ \text{N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2}$.

6 Calculer une charge

1. Le schéma montre que les charges se repoussent. La charge placée en B est donc de même signe que celle placée en A. De plus, la charge placée en A est négative car $q_A < 0$. Donc la charge placée en B est négative.

2. On a: $F_{A/B} = k \times \dfrac{|q_A| \times |q_B|}{d^2}$.

Donc $|q_B| = \dfrac{F_{A/B} \times d^2}{|q_A| \times k}$

$$|q_B| = \frac{4{,}60 \times 10^{-10}\,\text{N} \times (2{,}0 \times 10^{-9}\,\text{m})^2}{3{,}2 \times 10^{-19}\,\text{C} \times 9{,}0 \times 10^{9}\,\text{N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2}} = 6{,}4 \times 10^{-19}\ \text{C}.$$

Comme $q_B < 0$ il vient $q_B = -\,6{,}4 \times 10^{-19}$ C.

10 Étudier une migration d'ions

| Mobiliser et organiser ses connaissances.

Pour étalonner un conductimètre, on plonge la cellule conductimétrique dans une solution aqueuse contenant des ions potassium K^+ et chlorure $C\ell^-$.

L'appareil applique une tension électrique entre les deux plaques de la cellule qui sont alors chargées, l'une positivement, l'autre négativement.

1. Identifier la force responsable de la mise en mouvement des ions entre les plaques.

2.a. Quand les cations potassium migrent vers la plaque de droite, quel est le signe de la charge portée par cette plaque ?

b. Indiquer comment migrent alors les anions chlorure.

10 Étudier une migration d'ions

1. La force électrostatique entre les ions chargés et les plaques chargées est à l'origine de la mise en mouvement des ions.

2. a. Quand les cations K^+ se déplacent vers la plaque de droite il y a une force électrostatique attractive entre ces cations et la plaque de droite et une force électrostatique répulsive entre ces cations et la plaque de gauche.

La plaque de droite porte donc une charge de signe opposé à celui d'un cation, soit une charge négative.

La plaque de gauche porte donc une charge de même signe que celui d'un cation, soit une charge positive.

b. Par conséquent les anions $C\ell^-$ chargés négativement vont être repoussés par la plaque de droite et attirés par la plaque qui est chargée positivement. Ils se déplacent donc vers la plaque de gauche.

15 Connaître le champ de gravitation

CORRIGÉ

| Effectuer une analyse dimensionnelle.

La Lune est en interaction gravitationnelle avec la Terre. On note d la distance entre les centres des deux astres.

1. Exprimer la force exercée par la Terre sur la Lune en fonction de sa masse M_L et du champ de gravitation terrestre $\vec{\mathcal{G}}$.

2. Déduire de l'expression précédente l'unité de la valeur du champ de gravitation terrestre.

3. Schématiser, sans contrainte d'échelle, la force de gravitation exercée par la Terre sur la Lune et le champ de gravitation terrestre existant au même point.

15 Connaître le champ de gravitation

CORRIGÉ

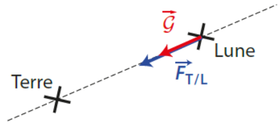
1. $\vec{F} = M_L\ \vec{\mathcal{G}}$

2. La valeur de la force s'exprime en N.

La masse s'exprime en kg.

La valeur du champ s'exprime donc en $\text{N} \cdot \text{kg}^{-1}$ car $\text{N} = \text{kg} \cdot \text{N} \cdot \text{kg}^{-1}$

3. Le champ gravitationnel $\vec{\mathcal{G}}$ de la Terre et la force $\vec{F}_{T/L}$ exercée par la Terre sur la Lune sont colinéaires et de même sens. Ils sont dirigés vers la Terre.



17 Champ de pesanteur en haut de l'Éverest

| Effectuer des calculs ; comparer à une valeur de référence.

L'Éverest est la plus haute montagne du monde avec une altitude $h = 8\,848$ m. Son sommet se situe à une distance $d = 6{,}382 \times 10^{6}$ m du centre de la Terre.

1. Exprimer la valeur de la force de gravitation subie, au sommet de l'Everest, par un alpiniste de masse m en fonction de G, d, m et M_T la masse de la Terre.

2. Exprimer la valeur du poids de l'alpiniste en fonction de l'intensité de la pesanteur au sommet de l'Everest g_E.

3. En assimilant le poids à la force de gravitation, déterminer l'expression de la valeur du champ de pesanteur en haut de l'Éverest.

4. Calculer cette valeur puis la comparer à celle de ce champ au niveau de la mer g_T.

Données

- $G = 6{,}67 \times 10^{-11}\ \mathrm{N \cdot kg^2 \cdot m^{-2}}$.
- $M_T = 5{,}97 \times 10^{24}\ \mathrm{kg}$.
- $g_T = 9{,}81\ \mathrm{N \cdot kg^{-1}}$.
- $m = 80\ \mathrm{kg}$.

17 Champ de pesanteur en haut de l'Éverest

1. La force de gravitation exercée par la Terre sur l'alpiniste a pour expression vectorielle : $\vec{F}_{T/A} = -\,G \times \dfrac{m \times M_T}{d_{TA}^{\ 2}}\ \vec{u}_{T\to A}$ où $\vec{u}_{T\to A}$ est un vecteur unitaire dirigé du centre de la Terre vers l'alpiniste.

Sa valeur est : $F_{T/A} = G \times \dfrac{m \times M_T}{d^2}$.

2. $\vec{P} = m \times \vec{g}_E$ la valeur du poids est donc $P = m \times g_E$

3. $P = F_{T/A}$ donc $m \times g_E = G \times \dfrac{m \times M_T}{d^2}$ soit $g_E = G \times \dfrac{M_T}{d^2}$

4. $g_E = 6{,}67\ \ 10^{-11}\ \mathrm{N \cdot m^2 \cdot kg^{-2}} \times \dfrac{5{,}97 \times 10^{24}\ \mathrm{kg}}{(6{,}382 \times 10^{6}\ \mathrm{m})^2}$

$g_E = 9{,}78\ \mathrm{N \times kg^{-1}}$; ce qui est plus faible qu'au niveau de la mer (9,81 N × kg⁻¹).

18 Un texte de Richard Feynman

CORRIGÉ

| Procéder à des analogies ; exploiter l'information.

« Considérons une force analogue à la gravitation qui varie comme l'inverse du carré de la distance, mais qui soit environ un milliard de milliards de milliards de milliards de fois plus intense. Et avec une autre différence. Il y a deux espèces de matières que nous pouvons appeler positive et négative. Celles de même espèce se repoussent et celles d'espèces différentes s'attirent. »

D'après Richard Feynman, *Le Cours de physique*, 1980.

1. Indiquer les points communs et les différences entre les deux interactions mentionnées.

2. Nommer les forces modélisant ces interactions.

3. Vérifier, dans le cas de deux protons d'un noyau, que le rapport entre la valeur de ces forces correspond à celui annoncé par Richard Feynman.

Données

- $m_{proton} = 1{,}7 \times 10^{-27}\ \mathrm{kg}$.
- $e = 1{,}6 \times 10^{-19}\ \mathrm{C}$.
- $G = 6{,}67 \times 10^{-11}\ \mathrm{N \cdot m^2 \cdot kg^{-2}}$.
- $k = 9{,}0 \times 10^{9}\ \mathrm{N \cdot m^2 \cdot C^{-2}}$.

18 Un texte de Richard Feynman

CORRIGÉ

1. Les deux interactions mentionnées ont comme point commun d'être des interactions à distance qui varient avec l'inverse du carré de la distance ; mais elles diffèrent car l'une des interactions ne peut être qu'attractive alors que l'autre peut être répulsive ou attractive, et leurs valeurs ont des ordres de grandeur très différents.

2. La première force évoquée est la force de gravitation. La seconde force évoquée est la force électrostatique.

3. $\vec{F}_{G,\,p/p} = -\,G \times \dfrac{m_{proton} \times m_{proton}}{d^2_{p-p}}\,\vec{u}_{p\to p}$

$\vec{F}_{E,\,p/p} = k \times \dfrac{q_{proton} \times q_{proton}}{d^2_{p-p}}\ \vec{u}_{p\to p}$ avec $q_{proton} = e$

$F_{E,\,p/p} = k \times \dfrac{e \times e}{d^2_{p-p}}$ et $F_{G,\,p/p} = G \times \dfrac{m_{proton} \times m_{proton}}{d^2_{p-p}}$

soit $\dfrac{F_E}{F_G} = \dfrac{k \times e^2}{G \times m^2_{proton}}$

$$\frac{F_E}{F_G} = \frac{9{,}0 \times 10^9\ \mathrm{N \cdot m^2 \cdot C^{-2}} \times (1{,}6 \times 10^{-19}\ \mathrm{C})^2}{6{,}67 \times 10^{-11}\ \mathrm{N \cdot m^2 \cdot kg^{-2}} \times \left(1{,}7 \times 10^{-27}\ \mathrm{kg}\right)^2} = 1{,}2 \times 10^{36}$$

Richard Feynman donne un ordre de grandeur de : $1 \times 10^9 \times 10^9 \times 10^9 \times 10^9 = 10^{36}$

Le rapport des valeurs des forces est bien dans l'ordre de grandeur donné.

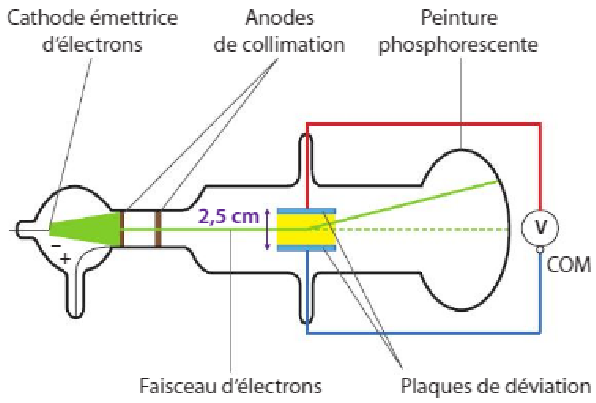
20 Connaître les critères de réussite

CORRIGÉ

Déviation de particules

| Interpréter des observations ; rédiger une explication.

Joseph John Thomson, prix Nobel de physique en 1906, a notamment apporté les preuves de l'existence de l'électron. Il a montré que les rayons produits par un tube cathodique peuvent être déviés par un champ électrique dans un sens qui indique alors que les particules constituant le rayon cathodique sont chargées négativement.



Dans cette expérience, la tension affichée par le voltmètre est + 300 V, ce qui entraîne l'existence d'un champ électrostatique de direction perpendiculaire aux plaques.

1. Identifier la plaque de déviation chargée positivement lors de l'expérience.

2. Exprimer, en fonction du champ électrostatique, la force exercée sur une particule chargée électriquement.

3. Expliquer comment Joseph John Thomson a pu déterminer le signe de la charge des particules constituant les rayons cathodiques.

20 Connaître les critères de réussite

CORRIGÉ

Déviation des particules

1. La plaque de déviation chargée positivement est la plaque du haut du schéma puisque la tension U mesurée par le voltmètre est positive avec la borne V du voltmètre reliée à la plaque du haut la borne COM reliée à la plaque du bas.

2. La force électrostatique $\vec{F}$ exercée sur une particule de charge q placée dans le champ $\vec{E}$ est $\vec{F} = q\,\vec{E}$.
3. Le champ est perpendiculaire aux plaques, orienté de la plaque positive du haut vers la plaque négative du bas (orienté depuis l'objet source, si la charge est positive).
Les particules constituant les rayons cathodiques sont déviées vers le haut. Elles sont donc soumises à une force électrique $\vec{F}$ verticale dirigée vers le haut opposée à $\vec{E}$ donc la charge q de chaque particule du faisceau est négative. (Cohérent car une particule chargée négativement est attirée par la plaque chargée de signe contraire.)

22 J'attire tout sur mon passage

Extraire l'information ; effectuer des calculs ; évaluer un ordre de grandeur.

« Vous n'en avez sans doute pas conscience, mais pendant que vous êtes assis en train de lire, vous attirez tout ce qui se trouve autour de vous – mur, plafond, lampe, chat – <u>du fait de votre petit (voire minuscule) champ de gravitation</u>. Et toutes ces choses nous attirent. [...] »
Bill BRYSON, *Une Histoire de tout ou presque...*, 2007.

1. Donner l'expression du champ de gravitation dû à un objet de masse M, en un point distant de d du centre de cet objet.

2. Une élève est assise à 1,0 mètre de son camarade de classe dont la masse est $m = 60$ kg.

a. Calculer la valeur $\mathcal{G}_m$ du champ de gravitation créé par le camarade de classe à l'emplacement de l'élève.

b. Calculer la valeur $\mathcal{G}_T$ du champ de gravitation de la Terre en un point de sa surface.

3. Commenter la phrase soulignée du texte.

Données
- $G = 6{,}67 \times 10^{-11}\ \text{N}\cdot\text{m}^2\cdot\text{kg}^{-2}$.
- $M_T = 5{,}97 \times 10^{24}$ kg.
- $R_T = 6{,}38 \times 10^{6}$ m.

22 J'attire tout sur mon passage

1. Le champ de gravitation dû à un objet de masse M, en un point distant de d du centre de cet objet a pour expression :

$\vec{\mathcal{G}} = -G \times \dfrac{M}{d^2}\,\vec{u}_{M\to\text{point}}$ où $\vec{u}_{M\to\text{point}}$ est un vecteur unitaire orienté du centre de l'objet de masse M vers le point situé à la distance d du centre de l'objet de masse M.

2. a. $\mathcal{G}_m = G \times \dfrac{m}{d^2} = 6{,}67 \times 10^{-11}\ \text{N}\cdot\text{m}^2\cdot\text{kg}^{-2} \times \dfrac{60\ \text{kg}}{(1{,}0\ \text{m})^2}$
$= 4{,}0 \times 10^{-9}\ \text{N}\cdot\text{kg}^{-1}$.

b. $\mathcal{G}_T = G \times \dfrac{M_T}{R_T^2} = 6{,}67 \times 10^{-11}\ \text{N}\cdot\text{m}^2\cdot\text{kg}^{-2} \times \dfrac{5{,}97 \times 10^{24}\ \text{kg}}{(6{,}38 \times 10^{6}\ \text{m})^2}$
$= 9{,}78\ \text{N}\cdot\text{kg}^{-1}$.

3. $\dfrac{\mathcal{G}_T}{\mathcal{G}_m} = \dfrac{9{,}78\ \text{N}\cdot\text{kg}^{-1}}{4{,}0\ \ 10^{-9}\ \text{N}\cdot\text{kg}^{-1}} = 2{,}4 \times 10^{9}$.

Le champ gravitationnel attractif créé par le camarade de classe est 2,4 milliards de fois plus petit que celui dû à la Terre.

23 Exercice à caractère expérimental

Détermination de la valeur du champ de pesanteur terrestre

Tracer un graphique ; effectuer des calculs ; proposer d'éventuelles améliorations de la démarche.

A Pourquoi connaître la valeur du champ de pesanteur ?

La connaissance de la valeur du champ de pesanteur en différents endroits du globe est essentielle dans de nombreux domaines scientifiques. Elle permet, entre autres, de connaître plus exactement la forme globale de la Terre.

B Une méthode de mesure de la valeur g du champ de pesanteur

Il est possible de déterminer la valeur du champ de pesanteur à l'aide d'un dispositif de chute. On laisse tomber une bille dans le dispositif et on mesure la durée de déplacement, le plus précisément possible.

On montre dans le modèle de la chute libre que le déplacement vertical y depuis le point de départ de la chute est lié à la durée de chute Δt par :

$$y = \frac{1}{2} g \times (\Delta t)^2$$

C Exemples de résultats obtenus à l'école Polytechnique de Lausanne (Suisse)

y (m)	0,100			
Δt (s)	0,1431			

1. Pour quelle raison est-il important de connaître la valeur du champ de pesanteur en différents points du globe ?

2. Compléter le tableau C en visionnant la vidéo de l'expérience réalisée à Lausanne puis représenter le graphique $y = f((\Delta t)^2)$.

lycee.hachette-education.com/pc/1re

3.a. Déterminer, à partir de la courbe, une relation mathématique entre y et $(\Delta t)^2$.

b. En déduire la valeur de champ de pesanteur à Lausanne.

4. Proposer une modification de protocole qui a pu permettre aux physiciens de l'École polytechnique de Lausanne de trouver une valeur $g = 9{,}806\ \text{N}\cdot\text{kg}^{-1}$ plus proche de la valeur de référence.

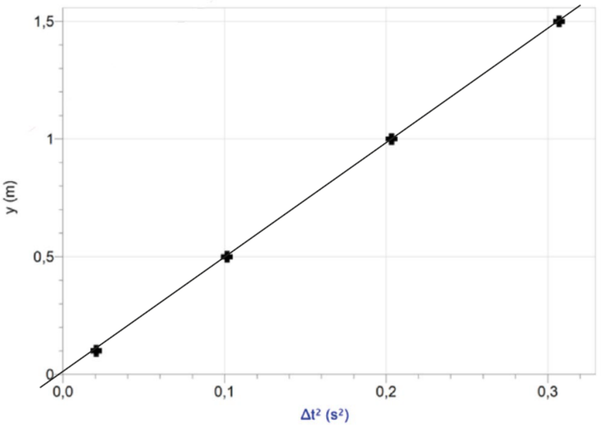
23 Exercice à caractère expérimental
Détermination de la valeur du champ de pesanteur terrestre

1. La connaissance de la valeur du champ de pesanteur en différents endroits du globe permet de connaître plus exactement la forme globale de la Terre en géophysique. Cela permet aussi de mieux connaitre le sous-sol, c'est utilisé par exemple en prospection minière.

2. Données recueillies sur la vidéo :

y (m)	Δt (s)
0,100	0,1431
0,500	0,3184
1,000	0,4509
1,500	0,5541

Représentation graphique :



3. a La modélisation du nuage de points par une fonction linéaire est satisfaisante car les points sont alignés sur une droite passant par l'origine du repère.
L'équation obtenue est $y = 4{,}90\,t^2$ en unité SI.

b. Par identification avec la loi indiquée dans le document **B** on en déduit $g_{(\text{Lausanne})} = 2 \times 4{,}90 = 9{,}80\ \text{N}\cdot\text{kg}^{-1}$.

4. Les physiciens de l'École polytechnique de Lausanne ont pu trouver une valeur $g = 9{,}806\ \text{N}\cdot\text{kg}^{-1}$ plus proche de la valeur de référence en réalisant, par exemple, leur expérience dans le vide.

25 Champ de gravitation du Soleil et d'un trou noir

Mobiliser ses connaissances ; effectuer des calculs ; faire preuve d'esprit critique.

A Le Soleil

La Terre de masse M_T, troisième planète du système solaire, gravite autour du Soleil à une distance $d_{TS} = 1{,}50 \times 10^{11}$ m du centre du Soleil, dont la masse est $M_S = 2{,}0 \times 10^{30}$ kg.

B Trou noir galactique

Les trous noirs sont difficiles à détecter. Le trou noir *Sagitarius A* est situé au centre de la Voie lactée à $d = 2{,}46 \times 10^{20}$ m de la Terre. Sa masse M est 3,7 millions de fois plus grande que celle du Soleil.

1. Exprimer la valeur de la force gravitationnelle qu'exerce le Soleil sur la Terre.

2. Exprimer la valeur de cette force en fonction de la masse M_T de la Terre et de celle $\mathcal{G}_S$ du champ gravitationnel du Soleil.

3.a. Déduire des deux questions précédentes l'expression de la valeur du champ gravitationnel du Soleil au niveau de la Terre.

b. Calculer cette valeur.

4. Par analogie, exprimer puis calculer la valeur du champ de gravitation du trou noir *Sagitarius A* au niveau de la Terre.

5. Montrer à l'aide d'une comparaison que ce trou noir ne perturbe pas le mouvement de la Terre.

Donnée
- $G = 6{,}67 \times 10^{-11}\ \text{N}\cdot\text{m}^2\cdot\text{kg}^{-2}$.

25 Champ de gravitation du Soleil et d'un trou noir

1. La force gravitationnelle qu'exerce le Soleil sur la Terre est :

$$\vec{F}_{S/T} = -G \times \frac{M_T \times M_S}{d_{TS}^2}\,\vec{u}_{S\to T}$$

Sa valeur est $F_{S/T} = G \times \dfrac{M_T \times M_S}{d_{TS}^2}$.

2. $F_{S/T} = M_T \times \mathcal{G}_S$

3. a. $G \times \dfrac{M_T \times M_S}{d_{TS}^2} = M_T \times \mathcal{G}_S$ soit $\mathcal{G}_S = G \times \dfrac{M_S}{d_{TS}^2}$

b. $\mathcal{G}_S = 6{,}67 \times 10^{-11}\ \text{N}\cdot\text{m}^2\cdot\text{kg}^{-2}\ \dfrac{2{,}0 \times 10^{30}\ \text{kg}}{(1{,}5 \times 10^{11}\ \text{m})^2}$
$= 5{,}9 \times 10^{-3}\ \text{N}\cdot\text{kg}^{-1}$.

4. Par analogie, le champ gravitationnel du trou noir au niveau de la Terre est :

$$\mathcal{G}_{\text{trou noir}} = G \times \frac{M}{d_{T\,\text{trounoir}}^2} = 6{,}67 \times 10^{-11}\ \text{N}\cdot\text{m}^2\cdot\text{kg}^{-2}\ \frac{3{,}7 \times 10^6 \times 2{,}0 \times 10^{30}\ \text{kg}}{(2{,}46 \times 10^{20}\ \text{m})^2} = 8{,}1 \times 10^{-15}\ \text{N}\cdot\text{kg}^{-1}$$

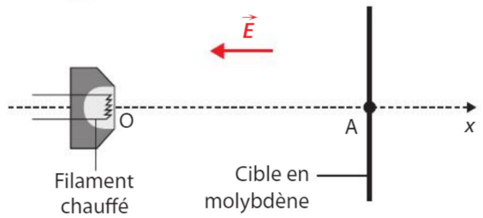
5. $\dfrac{\mathcal{G}_S}{\mathcal{G}_{\text{trou noir}}} = \dfrac{5{,}9 \times 10^{-3}\ \text{N}\cdot\text{kg}^{-1}}{8{,}1 \times 10^{-15}\ \text{N}\cdot\text{kg}^{-1}} = 7{,}3 \times 10^{11}$.

Le champ gravitationnel dû au trou noir est environ sept cent milliards de fois plus faible que celui dû au Soleil, donc le mouvement de la Terre n'est pas perturbé par l'existence de ce trou noir.

31 Produire des rayons X à l'aide d'électrons

CORRIGÉ — 30 min

Faire un schéma adapté ; effectuer des calculs ; prendre conscience des limites d'un modèle.



Les rayons X peuvent être produits dans des dispositifs appelés tubes de Coolidge (William David COOLIDGE, physicien américain, 1873-1975).
Dans ce dispositif, des électrons émis par un filament chauffé sont accélérés, entre les points O et A, sous l'effet

d'un champ électrique uniforme $\vec{E}$ dont la valeur est $E = 5,0 \times 10^3\ \text{V} \cdot \text{m}^{-1}$. Ce champ est obtenu grâce à une tension électrique U.
Les électrons se dirigent vers une cible de molybdène, avec laquelle ils interagissent pour produire les rayons X.

1. Donner l'expression vectorielle de la force électrique $\vec{F}_e$ subie par un électron en fonction du champ électrique $\vec{E}$. En déduire pourquoi on parle d'accélération des électrons.

2.a. Tracer selon l'axe OA une ligne du champ électrostatique. **Utiliser le réflexe 3**

b. Calculer la valeur de la force électrostatique exercée sur un électron dans ce champ. **Utiliser le réflexe 1**

3. La valeur de la vitesse de l'électron en A se calcule, dans le cadre de la mécanique classique, par la relation $v = \sqrt{\dfrac{2e \times U}{m_e}}$.

a. Calculer la valeur de la vitesse de l'électron lorsqu'il arrive en A dans le cas où la tension électrique U appliquée entre le filament et la cible est 100 kV.

b. La mécanique relativiste remplace la mécanique classique pour l'étude de mouvements lorsque la valeur de la vitesse du système atteint 10 % ou plus de la célérité de la lumière dans le vide.
Commenter le résultat précédent.

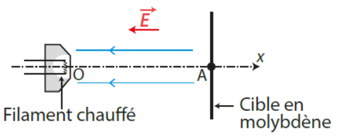
Données

- Charge électrique élémentaire : $e = 1,60 \times 10^{-19}$ C.
- Masse de l'électron : $m_e = 9,11 \times 10^{-31}$ kg.

31 CORRIGÉ Produire des rayons X à l'aide d'électrons (30 min)

1. La force électrostatique exercée sur un électron de charge $q = -e$ placé dans le champ $\vec{E}$ est $\vec{F}_e = -e\,\vec{E}$.
La force est opposée au vecteur champ ; elle propulse donc bien l'électron du filament vers la cible dans le tube, on peut dire qu'elle accélère les électrons.

2. a. Les lignes de champ sont tangentes au champ en chacun de leurs points et orientées dans le même sens que lui.
$\vec{E}$ est horizontal de droite à gauche dans le tube ; les lignes de champs sont donc horizontales et orientées de droite à gauche.



2. b. On a $\vec{F}_e = -e\,\vec{E}$ donc $F_e = e \times E$ soit
$F_e = 1,60 \times 10^{-19}\ \text{C} \times 5,0 \times 10^3\ \text{V} \cdot \text{m}^{-1} = 8,0 \times 10^{-16}$ N.
On obtient alors $F_e = 8,0 \times 10^{-16}$ N.

3. a. Au point A la vitesse est $v = \sqrt{\dfrac{2\,e \times U}{m_e}}$

soit $v = \sqrt{\dfrac{2 \times 1,60 \times 10^{-19}\ \text{C} \times 100 \times 10^3\ \text{V}}{9,11 \times 10^{-31}\ \text{kg}}} = 1,87 \times 10^8\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$.

3. b. $\dfrac{v}{c} = \dfrac{1,87 \times 10^8\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}}{3,0 \times 10^8\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}} = 0,62$;

v est environ égale à 62% de c la célérité de la lumière.
La mécanique relativiste doit remplacer la mécanique classique qui n'est plus adaptée pour le calcul de v supérieure à 10 % de c.