

I. Référentiel d'étude

Le mouvement d'un objet ponctuel est caractérisé par sa trajectoire et sa vitesse par rapport à un solide de référence appelé **référentiel**.

Le référentiel est dit **galiléen** si le **principe d'inertie** (première loi de Newton) est vérifié dans ce référentiel.

Un référentiel au repos ou en mouvement de translation uniforme par rapport à un référentiel galiléen est lui-même galiléen.

- Le **référentiel héliocentrique** est considéré comme galiléen.
- Le **référentiel géocentrique** est galiléen si l'étude ne dépasse pas quelques heures (pour négliger le mouvement de rotation de la Terre autour du Soleil).
- Le **référentiel terrestre** est galiléen si l'étude ne dépasse pas quelques minutes.

II. Cinématique, décrire le mouvement

1. Vecteur position

Dans le référentiel pris pour l'étude d'un mouvement, on choisit un **repère d'espace** orthonormé et un **repère de temps**. Le temps est compté à partir d'une origine à laquelle $t = t_0 = 0$. La position du mobile est donnée par son vecteur position à un instant t .

$$\overrightarrow{OM}(t) = x(t) \vec{i} + y(t) \vec{j} + z(t) \vec{k}$$

2. Vecteur vitesse

Une variation du vecteur position (en valeur et/ou direction) entraîne l'existence d'un vecteur vitesse. Pour un point $M(t_i)$ marquant la position d'un point mobile M à un instant t_i , le vecteur vitesse est défini par :

$$\vec{v}(t_i) = \frac{\overrightarrow{OM}(t_{i+1}) - \overrightarrow{OM}(t_{i-1})}{t_{i+1} - t_{i-1}} = \frac{\Delta \overrightarrow{OM}(t)}{\Delta t}$$

Le vecteur vitesse $\vec{v}(t)$ d'un point mobile à un instant t est caractérisé par :

- Sa **direction**, la tangente à la trajectoire au point considéré ;
- Son **sens**, celui du mouvement à l'instant t ;
- Sa **valeur** v , qui s'exprime en mètre par seconde ($m \cdot s^{-1}$).

Le vecteur vitesse est la dérivée du vecteur position par rapport au temps.

$$\vec{v}(t) = \frac{d\overrightarrow{OM}(t)}{dt}$$

$$\vec{v}(t) = \frac{dx}{dt} \vec{i} + \frac{dy}{dt} \vec{j} + \frac{dz}{dt} \vec{k} = v_x \vec{i} + v_y \vec{j} + v_z \vec{k} ;$$

La valeur de la vitesse à un instant t est : $v(t) = \|\vec{v}(t)\| = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}$

3. Vecteur accélération

Une variation du vecteur vitesse (en valeur et/ou direction) implique l'existence d'un vecteur accélération :

$$\vec{a}(t_i) = \frac{\vec{v}(t_{i+1}) - \vec{v}(t_{i-1})}{t_{i+1} - t_{i-1}} = \frac{\Delta \vec{v}(t_i)}{\Delta t}$$

Le vecteur accélération $\vec{a}(t)$ d'un point mobile à un instant t est caractérisé par :

- Sa **direction** et son **sens**, qui sont identiques à ceux du vecteur variation de vitesse $\Delta \vec{v}(t)$;
- Sa valeur, $a(t) = \frac{\Delta v(t)}{\Delta t}$, s'exprime en mètre par seconde au carré ($m \cdot s^{-2}$).

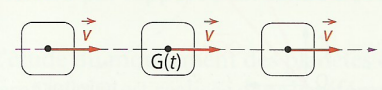
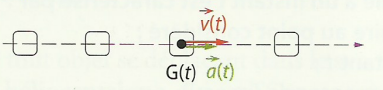
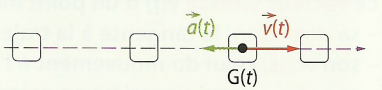
Le vecteur accélération est la dérivée du vecteur vitesse par rapport au temps.

$$\vec{a}(t) = \frac{d \vec{v}(t)}{dt}, \text{ soit : } \vec{a}(t) \begin{cases} a_x(t) = \frac{dv_x(t)}{dt} = \frac{d^2 x}{dt^2} \\ a_y(t) = \frac{dv_y(t)}{dt} = \frac{d^2 y}{dt^2} \\ a_z(t) = \frac{dv_z(t)}{dt} = \frac{d^2 z}{dt^2} \end{cases} ; \text{ ainsi } a(t) = \sqrt{a_x(t)^2 + a_y(t)^2 + a_z(t)^2}$$

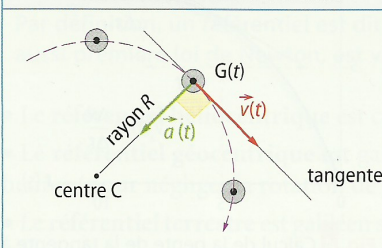
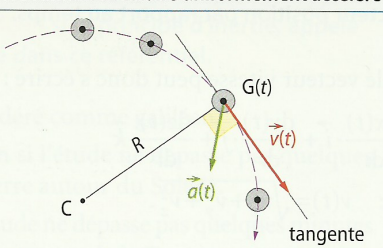
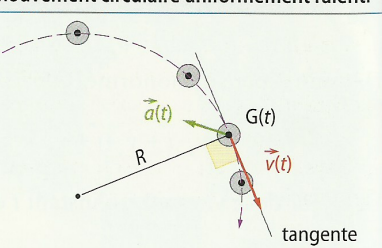
Activité 2 page 291 ; (exercice 20 page 302) ; exercices 36 et 37 page 306

4. Mouvements rectilignes et circulaires

Un mouvement est **rectiligne** si la trajectoire est une droite.

Mouvement rectiligne uniforme	Mouvement rectiligne uniformément accéléré	Mouvement rectiligne uniformément ralenti
		
Le vecteur vitesse $\vec{v}$ est constant au cours du temps : $\vec{v}(t) = \vec{v} = \text{constante}$. $\vec{a} = \vec{0}$ donc $\vec{v} \cdot \vec{a} = 0$.	Le vecteur accélération est constant au cours du temps : $\vec{a}(t) = \vec{a} = \text{constante}$.	
	Les vecteurs $\vec{v}$ et $\vec{a}$ sont de même sens. La valeur de v augmente. $\vec{v} \cdot \vec{a} > 0$.	Les vecteurs $\vec{v}$ et $\vec{a}$ sont de sens opposés. La valeur de v diminue. $\vec{v} \cdot \vec{a} < 0$.

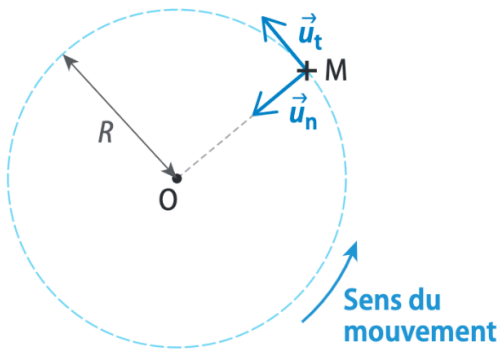
Un mouvement est **circulaire** si la trajectoire est un cercle (ou un arc de cercle).

Mouvement circulaire uniforme	Mouvement circulaire uniformément accéléré	Mouvement circulaire uniformément ralenti
		
Le vecteur vitesse $\vec{v}(t)$ varie mais sa valeur v reste constante. Le vecteur accélération $\vec{a}$ est dirigé vers le centre de la trajectoire. $\vec{v} \cdot \vec{a} = 0$.	Le vecteur accélération est constant au cours du temps : $\vec{a}(t) = \vec{a} = \text{constante}$. Il est toujours dirigé vers l'intérieur de la trajectoire.	
	La valeur de la vitesse v augmente. $\vec{v} \cdot \vec{a} > 0$.	La valeur de la vitesse v diminue. $\vec{v} \cdot \vec{a} < 0$.

Le repère de Frenet

Il est plus simple d'étudier les mouvements circulaires dans le repère de Frenet.

Le repère de Frenet est le repère d'origine $M(t)$ et de vecteurs unitaires :



$\vec{u}_t(t)$: tangent à la trajectoire, orienté dans le sens du mouvement ;

$\vec{u}_n(t)$, selon la direction du rayon (radial) et orienté vers le centre (centripète).

Dans le repère de Frenet $(M(t); \vec{u}_t(t); \vec{u}_n(t))$ avec $v(t)$ la norme du vecteur vitesse $\vec{v}(t)$ du point M au cours du temps, les coordonnées des vecteurs vitesses $\vec{v}(t)$ et accélération $\vec{a}(t)$ du point M sont :

$$\vec{v}(t) = v(t)\vec{u}_t, \text{ soit } \vec{v}(t) \begin{cases} v_t(t) = v(t) \\ v_n(t) = 0 \end{cases}$$

$$\text{et } \vec{a}(t) = \frac{dv}{dt}\vec{u}_t(t) + \frac{v^2}{R}\vec{u}_n(t), \text{ soit } \vec{a}(t) \begin{cases} a_t(t) = \frac{dv}{dt} \\ a_n(t) = \frac{v^2}{R} \end{cases}$$

Remarque, il faut connaître et exploiter ces relations les yeux fermés, mais les démonstrations, faites en classe pour les retrouver, ne sont pas exigibles.

Exercices 28 page 304 ; 35 et 38 page 306

III. Dynamique

Révisions et échauffements pages 314 et 315

1. Système et centre de masse

Un **système** est un solide ou un ensemble de points matériels. Le **centre de masse** d'un système est le point situé à la position moyenne de la répartition des masses du système. Le mouvement d'un système peut être modélisé par le mouvement de ce point, affecté par la masse totale du système.

Dans le cas d'un solide homogène, le centre de masse est confondu avec le centre géométrique du solide.

2. Première loi de Newton

Première loi de Newton, appelée également **principe d'inertie** :

Dans un référentiel galiléen, le centre de masse d'un système isolé ou pseudo-isolé persévère dans son état de repos ou de mouvement rectiligne uniforme.

$$\Sigma \vec{F}_{ext} = \vec{0} \Leftrightarrow \vec{a}_G = \vec{0}$$

Le système est dit à **l'équilibre**

Remarque : Un référentiel est dit galiléen si le principe d'inertie est vérifié dans ce référentiel

Un système **isolé** n'est soumis à aucune force
Un système **pseudo-isolé** est soumis à des forces extérieures qui se compensent

3. Deuxième loi de Newton

La deuxième loi de Newton est aussi appelée **Principe Fondamental de la Dynamique (PFD)**

Dans un référentiel, la somme vectorielle des forces qui s'exercent sur un système de masse m constante est égale au produit de sa masse par le vecteur accélération de son centre de masse :

$$\Sigma \vec{F}_{ext} = m \vec{a}(t) = m \frac{d\vec{v}}{dt}$$

4. Méthode et exemples variés

a. Méthode

Pour utiliser les deux premières lois de Newton, nous utiliserons la méthode suivante :

- Définir le système et choisir un point pour l'étudier
- Définir le référentiel d'étude, il doit être galiléen (ou supposé galiléen)
- Faire le bilan des forces appliquées au système (faire un schéma)
- Ecrire l'expression vectorielle de la loi de Newton utilisée
- Projeter la relation vectorielle sur un système d'axes pour obtenir plusieurs équations et les résoudre (Avec la deuxième loi de Newton, les primitives des équations horaires de l'accélération donneront les équations horaires de la vitesse, puis les primitives des équations horaires de la vitesse donneront les équations horaires de la position)

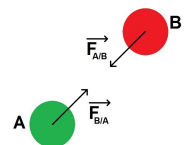
b. Force gravitationnelle (chap. Satellites)

La force gravitationnelle exercée par un point matériel A, de masse m_A , sur un point matériel, de masse m_B , à une distance r de A, est :

$$\vec{F}_{A/B} = -G \frac{m_A \times m_B}{r^2} \vec{u}$$

où $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$ est la constante de gravitation universelle et $\vec{u}$ un vecteur unitaire orienté de A vers B.

Remarque : un point de masse m_A génère en tout point B de masse m_B à une distance r de A, un champ de gravitation $\vec{g}_A(B) = -G \frac{m_A}{r^2} \vec{u}$; ainsi A exerce sur B la force de gravitation $\vec{F}_{A/B} = m_B \cdot \vec{g}_A(B)$.



Exercice 35 page 332

c. Le poids (Paragraphe IV)

La force exercée par la Terre sur un objet au voisinage de la surface terrestre (approximativement la force gravitationnelle) est appelée **poids**.

Le poids d'un objet de masse m , au voisinage du sol terrestre, s'écrit $\vec{P} = m \times \vec{g}$; le poids est vertical et orienté vers le bas.

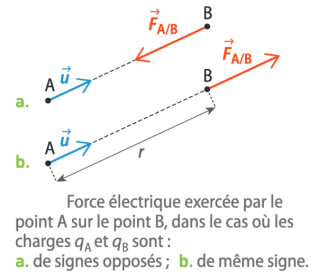
Exercice 32 page 332

d. Force électrique (Paragraphe IV)

La force électrique qu'exerce un point A, de charge électrique q_A , sur un point B de charge électrique q_B , à une distance r de A, est :

$$\vec{F}_{A/B} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_A \times q_B}{r^2} \vec{u}$$

avec, $\frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 8,99 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2}$



Remarque : un point de charge électrique q_A génère en tout point B de charge

q_B à une distance r de A, un champ électrique $\vec{E}_A(B) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_A}{r^2} \vec{u}$; ainsi A exerce sur B la force de gravitation

$\vec{F}_{A/B} = q_B \cdot \vec{E}_A(B)$. Dans le chapitre suivant nous verrons qu'il est possible de créer un champ électrique uniforme $\vec{E}$. Une particule de charge q placée dans ce champ subit alors une force électrique $\vec{F} = q\vec{E}$.

e. Forces de contacts entre solides

Un solide en contact avec le système exerce sur lui une force nommée réaction du support $\vec{R}$, on étudie

Exercice 40 (question 1) page 332 ; Exercice 48 page 335

séparément ses composantes normale $\vec{R}_N$ et tangentielle $\vec{R}_T$ (frottements).

f. Force de tension

Un système accroché à un fil tendu subit de la part du fil une force de tension $\vec{T}$, de même direction que le fil et orienté du système vers l'extrémité opposée du fil.

Exercice 40 (question 2) page 332

g. Forces exercées par un fluide sur un solide

Un solide plongé dans un fluide est soumis à des forces pressantes dont la somme est une force verticale orientée vers le haut $\vec{F}_A$, nommée **poussée d'Archimède** : $\vec{A} = -\rho_{\text{fluide}} V_i \vec{g}$, avec V_i le volume de la partie du corps qui se trouve immergée dans le fluide.

Quelle est la proportion émergée d'un cube de bois en chêne ($d=0,85$) qui flotte sur l'eau ($d=1$) ? Même question pour une boule en chêne.

Un solide plongé dans un fluide est soumis à la **force de frottement fluide** $\vec{f}$ opposée au mouvement. Cette force traduit la résistance au mouvement du système par le fluide.

Exercice 59 page 337

8. Troisième loi de Newton

Principe des **actions réciproques** : Deux systèmes en interaction exercent l'un sur l'autre des forces opposées.

Soit un système A exerçant sur un système B la force $\vec{F}_{A/B}$; B exerce sur A la force $\vec{F}_{B/A}$ opposée :

$$\vec{F}_{A/B} = -\vec{F}_{B/A}$$

IV. Champ uniforme

Révisions et échauffements pages 344 et 345

1. Mouvement dans un champ de pesanteur uniforme

Nous étudions le mouvement d'un système de masse m au voisinage de la Terre. Nous considérons que le champ de pesanteur $\vec{g}$ est uniforme (vertical, vers le bas et d'intensité $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$).

Nous considérons dans ce chapitre que le système n'est soumis qu'à son poids, un tel système est dit en **chute libre**.

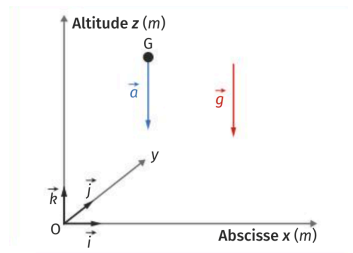
Ainsi dans le référentiel terrestre supposé galiléen, le principe fondamental de la dynamique donne :

$$m \cdot \vec{a} = \vec{P} = m \cdot \vec{g} \\ \text{soit } \vec{a} = \vec{g}$$

a. Chute sans vitesse initiale

A l'instant $t = 0$, le point matériel G est lâché sans vitesse initiale d'un point O . Dans le référentiel terrestre supposé galiléen, on choisit un repère d'espace orthonormé $(O, \vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$, dans lequel l'axe vertical $(O, \vec{k})$ est dirigé vers le haut.

Remarque : Dans ce cours j'ai choisi l'axe $(O, \vec{k})$, comme étant l'axe vertical, votre livre a fait le choix de nommer l'axe $(O, \vec{j})$ comme étant l'axe vertical. Ce n'est qu'une convention, cela ne doit pas vous perturber outre mesure !



Méthode :

Application de la deuxième loi de Newton, coordonnées de $\vec{a}$, puis de $\vec{v}$ et enfin de $\overrightarrow{OG}$

Le mouvement de chute sans vitesse initiale d'un point matériel dans un champ de pesanteur uniforme est :

- Un mouvement rectiligne selon la verticale du point du lâcher
- Vers le bas (le centre de la Terre)
- Uniformément accéléré, d'accélération $\vec{a} = \vec{g}$

Exercices 31 et 32 page 363

b. Chute avec vitesse initiale

À l'instant $t = 0$, le point matériel G est lancé avec vitesse initiale $\vec{v}(t_0) = \vec{v}_0$ d'un point O .

Dans le référentiel terrestre supposé galiléen, on choisit un repère d'espace orthonormé $(O, \vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$, de telle sorte que le vecteur $\vec{v}_0$ soit dans le plan vertical $(O, \vec{i}, \vec{k})$. L'angle que fait le vecteur $\vec{v}_0$ avec l'horizontale est noté α . Les coordonnées de $\vec{v}_0$ sont :

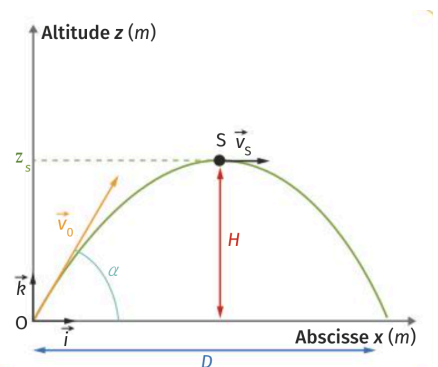
- $v_{0x} = v_0 \cdot \cos \alpha$
- $v_{0z} = v_0 \cdot \sin \alpha$

La seconde loi de Newton donne l'accélération $\vec{a}$ puis par intégrations successives on obtient la vitesse $\vec{v}(t)$ puis les équations horaires du mouvement $x(t)$; $y(t)$; $z(t)$.

La trajectoire est donnée par $z = f(x)$

La trajectoire d'un point matériel, lancé dans le champ de pesanteur uniforme avec une vitesse initiale non verticale, est une **portion de parabole** dans le plan vertical contenant le vecteur $\vec{v}_0$.

Parmi les questions fréquentes nous avons à retrouver la **flèche** (la hauteur H) et la **portée** (la distance D).



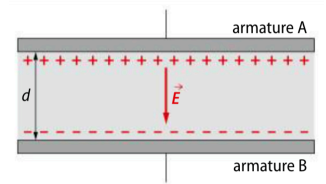
Exercices 25 à 27 page 362 ; (Exercice 20 page 360) ; Exercice 21 page 361 ; Exercices 28 et 29 page 363 ; Exercice 35 page 364, ...

3. Mouvement dans un champ électrique uniforme

1. Le condensateur plan

Un condensateur plan est formé de deux armatures métalliques, plaques conductrices planes et parallèles, proches l'une de l'autre, séparées par un isolant. Entre ces deux armatures règne un champ électrique uniforme $\vec{E}$ perpendiculaire aux armatures et orienté du $\oplus$ vers le $\ominus$.

$$E = \frac{U_{AB}}{d}$$



b. Particule chargée dans un champ électrique uniforme

Une particule de masse m et de charge q est placée dans un champ électrique uniforme caractérisé par $\vec{E}$. Elle est soumise à une force électrique $\vec{F}$: $\vec{F} = q \cdot \vec{E}$

Son poids est considéré comme négligeable devant la valeur de $\vec{F}$ (dans certains exercices, il peut être demandé de le vérifier)

L'application de la deuxième loi de Newton dans le référentiel terrestre supposé galiléen donne :

$$m \cdot \vec{a} = \vec{F} = q \cdot \vec{E}$$

$$\text{Soit } \vec{a} = \frac{q}{m} \vec{E}$$

Le vecteur accélération $\vec{a}$ d'une particule chargée dans un champ électrique uniforme est dirigé selon le champ électrique $\vec{E}$.

Le sens du vecteur $\vec{a}$ dépend de l'orientation du champ $\vec{E}$ et du signe de la charge q .

Exercices : 22 (1 à 3) p. 362 ; 47 p. 366 ; 50 p. 366 ; 52 p. 367

3. Aspect énergétique

a. Énergie mécanique

L'énergie mécanique E_m est la somme des énergies cinétique et potentielle. Elle se conserve si le système n'est soumis qu'à des forces conservatrices comme le poids $\vec{P}$ ou la force électrique $\vec{F}$.

Lorsque l'énergie mécanique ne se conserve pas, sa variation $\Delta E_m(A \rightarrow B)$, pour un système se déplaçant d'un point A vers un point B est égale à :

$$\Delta E_m(A \rightarrow B) = E_m(B) - E_m(A) = \Sigma W_{AB}(\vec{F}_{nc})$$

Où $\Sigma W_{AB}(\vec{F}_{nc})$ est la somme des travaux des forces non conservatrices

b. Théorème de l'énergie cinétique

Dans un référentiel galiléen, la variation de l'énergie cinétique d'un système de masse m est égale à la somme des travaux des forces s'exerçant sur le système entre les points A et B :

$$\Delta E_C(A \rightarrow B) = \frac{1}{2} m \cdot v_B^2 - \frac{1}{2} m \cdot v_A^2 = \Sigma W_{AB}(\vec{F}_{ext})$$

Dans le cas du mouvement d'un solide en chute libre, la seule force étant le poids $\vec{P}$, nous avons :

$$\Delta E_C(A \rightarrow B) = m \cdot g \cdot (z_A - z_B)$$

Dans le cas d'une particule accélérée par un champ $\vec{E}$, la seule force s'exerçant étant la force électrique, nous avons :

$$\Delta E_C(A \rightarrow B) = q \cdot U_{AB}$$

Exercices : 22 (question 4) p. 362 ; 24 p.362 ; 46 p.366

Accélérateur linéaire de particules

Les accélérateurs de particules sont utilisés dans différents domaines, notamment le domaine médical, mais également en physique subatomique pour étudier la composition des particules.

Comment peut-on augmenter l'énergie cinétique d'une particule chargée ?

Principe d'un accélérateur de particules

Un accélérateur linéaire de particules est un appareil permettant de communiquer de l'énergie cinétique à une particule chargée.

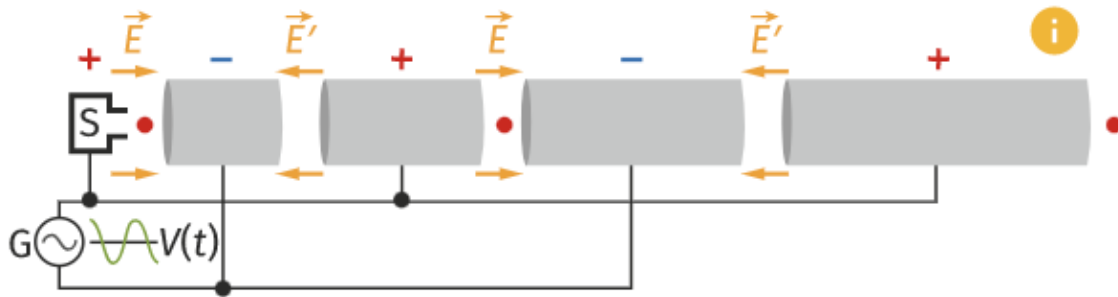
En 1928, Rolf Widerøe fut l'un des premiers à construire un tel accélérateur, afin de communiquer à des ions potassium K^+ une énergie cinétique de 50 eV . Son accélérateur était constitué d'une source S et d'une succession de tubes sous vide séparés par des interstices.

Les sections de deux cylindres adjacents présentent des charges de signes opposés : un champ électrique $\vec{E}$ règne donc dans ces interstices. À l'intérieur des tubes, le champ électrique est nul, les particules s'y déplacent à vitesse constante.

La tension du générateur étant alternative, les sections des cylindres voient le signe de leur charge changer après chaque passage de particule.

Schéma du Linac de Widerøe

Le schéma ci-dessous décrit l'un des deux états possibles de l'accélérateur, pour une particule se trouvant entre la source, chargée positivement, et le premier tube, chargé négativement.



Données

Masse d'un ion potassium K^+ : $m = 6,5 \cdot 10^{-25} \text{ kg}$; conversion d'unité : $1 \text{ eV} = 1,60 \times 10^{-19} \text{ J}$

Questions

1. En utilisant le théorème de l'énergie cinétique, expliquer à quelle condition une particule de charge q peut être accélérée par un champ électrique $\vec{E}$
2. Déterminer la vitesse v_{finale} d'un ion potassium K^+ à la sortie de l'accélérateur.
3. Reproduire le schéma du Linac de Widerøe et faire les modifications nécessaires pour qu'il corresponde à l'autre alternance de la tension. Justifier cette alternance.