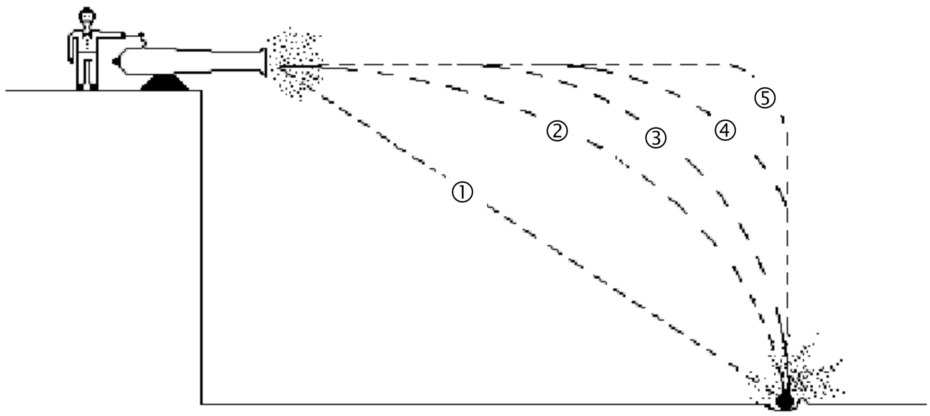
Chapitre D3.
Mouvements dans un champ uniforme

Se positionner

1. Deux billes métalliques de même taille dont l'une est deux fois plus lourde que l'autre sont lâchées en même temps. La durée nécessaire pour qu'elles touchent le sol :

① est deux fois plus grande pour la bille lourde
② est deux fois plus grande pour la bille légère
③ est plus grande pour la bille lourde mais pas forcément deux fois plus
④ est plus grande pour la bille légère mais pas forcément deux fois plus
⑤ est la même pour les deux billes

2. On lance un boulet de canon du haut d'une falaise. Quelle sera sa trajectoire ?



Activité 1- Les mouvements de chute selon vous, selon Galilée, puis selon Newton…

. . . .

PARTIE 1 : quel objet tombe le premier ?

	On lâche en même temps et de la même hauteur :	Prévision : *l'objet qui tombe en premier est…*	Observation : *l'objet qui tombe en premier est…*
A	*deux feuilles de papier identiques chiffonnées en boule, mais l'une est deux à trois fois plus grosse.*		
B	*un marteau et une plume à la surface de la Terre.*		
C	*un marteau et une plume à la surface de la Lune.*		

Activité 1 - PARTIE 2 : les lois de Galilée sur les chutes

Galileo Galilei, dit « Galilée », est le premier physicien, au tout début du XVIIème siècle, à étudier rigoureusement la chute des corps. Après avoir minutieusement étudié la chute de divers objets depuis la tour de Padoue, il écrit deux lois ***empiriques*** :

❶	« *En un même lieu et pour tous les corps, l'accroissement de la vitesse en fonction du temps est constant.* »	$\frac{\Delta v}{\Delta t} =$
❷	« *Les espaces parcourus en chute libre sont proportionnels aux carrés des temps et indépendants de la masse* »	$h =$

1. Dans la colonne de droite, compléter les relations pour traduire chacun des énoncés.

Seule la situation sur la Lune vérifie ces lois. C'est ce qu'on appelle une **chute libre**, définie comme un mouvement pour lequel le poids est la seule force exercée.

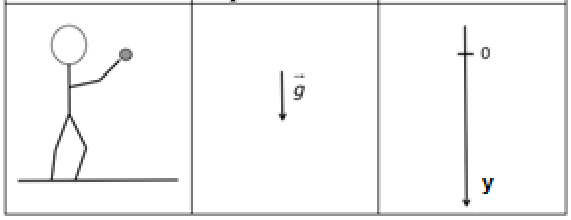
2. En appliquant la 2nde loi de Newton à un système *en chute libre*, exprimer son vecteur accélération.

Activité 1 - PARTIE 3 - étude d'une chute libre à l'aide des lois de Newton

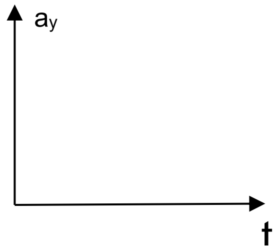
*Un des grands succès de la physique de Newton est sa capacité à **démontrer** les lois de Galilée sur les chutes libres. C'est ce que nous allons faire.*

Une chute libre est une modélisation d'une chute réelle <u>où seul est pris en compte le poids du système étudié</u> : **la chute libre est bien un modèle** et pas un évènement !

Schéma de la situation	Champ de pesanteur	repère

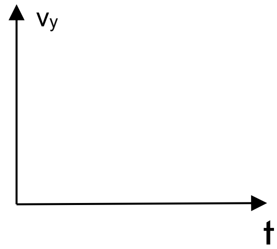


On étudie un objet de masse m, lâché sans vitesse initiale au-dessus du sol à une date $t = 0$. On suppose que son mouvement peut être modélisé par une chute libre. L'étude a lieu dans le référentiel terrestre, supposé galiléen et muni d'un repère d'axe (Oy), orienté vers le bas (cf ci-contre) et tel que O coïncide avec la position initiale de G.



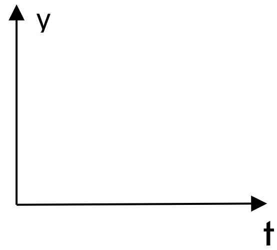
1. Déduire de l'expression de $\vec{a}$ l'expression de a_y, et représenter son évolution ci-contre.

On va utiliser deux fois une méthode de résolution par intégration pour déterminer la coordonnée verticale du vecteur vitesse puis celle du vecteur position



2. On rappelle que $a_y = \frac{dv_y}{dt}$ où v_y est la coordonnée verticale de la vitesse. En déduire une expression générale de $v_y(t)$ (une primitive de a_y donc) faisant intervenir g, t et une constante C indépendante du temps.

3. Déterminer la valeur de cette constante C satisfaisant la valeur de v_y à la date initiale puis représenter l'évolution de v_y(t) ci-contre.



4. En utilisant $v_y = \frac{dy}{dt}$, trouver une expression générale de $y(t)$ (une primitive de v_y donc) faisant intervenir g, t et une constante C' indépendante du temps.

5. Déterminer la valeur de C' en utilisant le fait que $y(t = 0) = 0$, puis représenter l'évolution de y(t) ci-contre.

Activité 1 - PARTIE 4 - Étude expérimentale : mon smartphone est-il en chute libre ?

Tendre vers la chute libre

Ouvrir l'application *Phyphox*.

- Choisir sur l'application "Phyphox" l'expérience "Accélération sans g" ou, si elle n'est pas disponible sur votre smartphone, "Accélération avec g".
- Après avoir lancé l'enregistrement, lâcher le smartphone en le maintenant initialement horizontal à peu près à hauteur de vos yeux.

1) Indiquer si le smartphone peut être considéré comme en chute libre.
2) Indiquer avec quelle orientation on a intérêt à lâcher le smartphone pour s'approcher au mieux de la chute libre ?
3) Réaliser 2 ou 3 expériences pour vérifier votre affirmation (en notant les résultats).

Détermination de la hauteur de chute

- Utiliser les fonctionnalités de Phyphox pour déterminer la valeur de la durée de chute notée Δt. En observant la courbe obtenue, évaluer la durée de la chute en repérant la grande variation de la valeur de l'accélération lorsqu'on lâche le smartphone et celle observée lorsque le smartphone touche le sol.
- Reproduire l'expérience une ou deux fois pour vérifier qu'on trouve toujours approximativement la même durée de chute.

4) Indiquer la valeur de la durée de chute notée Δt.
5) En déduire la hauteur de chute d'après la loi de Galilée écrite $h = \frac{1}{2} g \Delta t^2$ (on prendra $g = 10\ m.s^{-2}$)
6) Comparer à la hauteur mesurée directement (entre le point d'impact et vos yeux).

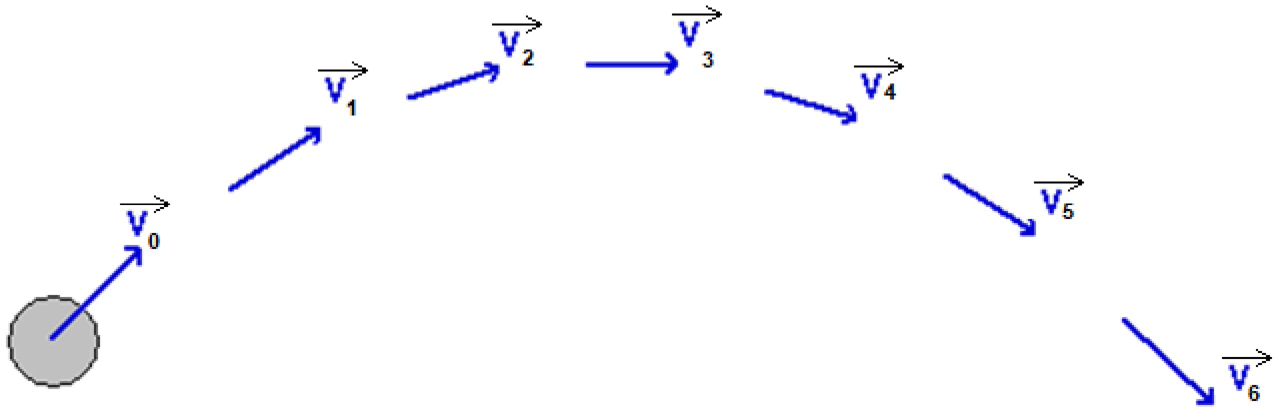
Pour aller plus loin… Si on lâche d'une hauteur deux fois moins importante, que prévoit la loi de Galilée pour la nouvelle durée de chute ? Avec un nouveau lâcher, vérifier que la prévision est approximativement vérifiée.

Activité 2- Avec une vitesse initiale non nulle…

*Dans cette activité on étudie des **chutes libres** d'objets lancés **avec une vitesse initiale quelconque** à la surface de la Terre (on dit alors un **projectile**). On se limite aux situations pour lesquelles le champ de pesanteur peut être considéré uniforme (ce qui suppose des trajectoires pas trop grandes).*

Partie 1- Description cinématique d'une chute libre simulée

On simule une telle chute avec vitesse initiale à l'aide d'un logiciel de simulation qui utilise les lois de Newton. La figure ci-dessous indique les positions successives du centre d'inertie d'un système et son vecteur vitesse à intervalle de temps noté Δt.



En utilisant uniquement vos connaissances du chapitre 1, vérifier que l'accélération de ce système est en accord avec le fait qu'on ait simulé une chute libre. On déterminera graphiquement la direction et le sens du vecteur accélération en un point qui dépend de votre groupe.

Mutualiser les résultats en comparant vos tracés.

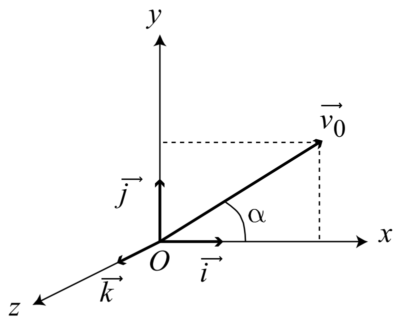
Activité 2 - Partie 2- Description des conditions du lancer : premiers éléments de modélisation

On étudie le centre d'inertie du projectile dans le champ de pesanteur uniforme.

À une date $t = 0$, on lui communique une vitesse initiale $\overrightarrow{v_0}$.

Le repère d'étude est choisi de la façon suivante :

- axe (Oy) : selon la verticale et vers le haut ;
- axe (Ox) : tel que $\overrightarrow{v_0}$ soit contenu dans le plan (*xOy*) ;
- axe (Oz) : tel que le repère (O, x, y, z) soit orthonormé direct.



On peut alors décrire le vecteur vitesse initiale par sa valeur v_0 et par l'angle, noté α, qu'il fait avec l'horizontale (souvent appelé *angle de tir*).

1. Exprimer les deux coordonnées v_{x0} et v_{y0} du vecteur $\overrightarrow{v_0}$.

2. <u>A votre avis</u>, pour lancer un projectile le plus loin possible, <u>avec un vecteur vitesse initiale donné</u> (α et v_0 fixés), il faut :
   1- ☐ prendre un objet le plus léger possible
   2- ☐ prendre un objet le plus lourd possible
   3- ☐peu importe la masse

3. <u>A votre avis</u>, pour lancer un projectile de masse donnée le plus loin possible, il faut que :

a. À α constant,
1☐ v_0 soit le plus grand possible
2☐ v_0 soit le plus faible possible
3☐ ni l'un ni l'autre

b.b. À v_0 constant,
1☐ α soit le plus grand possible
2☐ α soit le plus faible possible
3☐ ni l'un ni l'autre (proposer alors l'angle optimal)

Activité 2 - Partie 3- Étude théorique

1. **Le vecteur accélération.**

   En appliquant la 2ème loi de Newton au projectile, donner les 3 coordonnées du vecteur accélération du centre d'inertie du système dans le repère décrit précédemment.

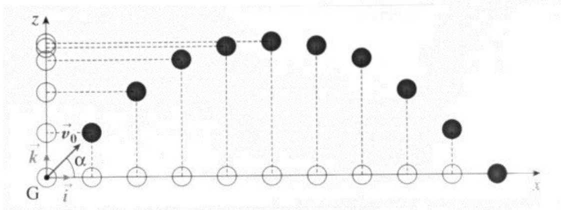
2. **De l'accélération à la vitesse…**

   Déterminer les coordonnées du vecteur vitesse v_x(t), v_y(t) et v_z(t).

3. **De la vitesse à la position…**

   Déterminer les coordonnées de la position du centre d'inertie : x(t), y(t) et z(t)), dites **équation-horaires**.

4. Indiquer ce qui permet d'affirmer que le mouvement est plan.



5. Qualifier le mouvement

   - selon l'axe horizontal Ox : . . . .

   - selon l'axe vertical Oy : . . . .

6. *L'équation de la trajectoire est la fonction associant y à x.*
   A l'aide des deux équations horaires x(t) et y(t), en éliminant t, établir l'équation de la trajectoire sous la forme

$$y(x) = .\,.\,.\,.\,.\,.\,.\ x^2 + .\,.\,.\,.\,.\,.\,.\ x + .\,.\,.\,.\,.\,.\,.\,.$$

Pour aller plus loin :
On appelle « portée du tir » la distance horizontale parcourue par le projectile lorsqu'il est de nouveau à une altitude $y = 0$. Sur la trajectoire, représenter la portée du tir. Déterminer son expression en exploitant l'équation de la trajectoire. Pour quelle valeur de l'angle α la portée est-elle maximale ?
Corriger alors éventuellement vos prévisions initiales

Activité 2 - Partie 4 - Étude expérimentale

Vous disposez d'une vidéo d'un projectile lancé avec une vitesse initiale v_0 et avec un angle de lancer α inconnus. À l'aide d'un logiciel de pointage (Aviméca) et de traitement des données (Regressi), vous devez :

1. Modéliser l'évolution de y en fonction de x et vérifier qu'on obtient bien une parabole. Noter les 3 valeurs données par la modélisation numérique :

$$y\ (x) = .\,.\,.\,.\,.\,.\,.\ x^2 + .\,.\,.\,.\,.\,.\,.\ x + .\,.\,.\,.\,.\,.\,.\,.$$

2. Faire calculer les valeurs de v_y (coordonnée verticale de la vitesse).
3. Faire afficher successivement les graphes d'évolution (au cours du temps) des deux grandeurs ci-dessous et donner les expressions prévues par le modèle de la chute libre.

grandeur	expressions littérales prévues par le modèle de la chute libre	expressions issues des modélisations numériques
x(t)		
v_y(t)		

4. Modéliser numériquement ces deux évolutions (ce qui permet de vérifier que le mouvement peut être modélisée par une chute libre) et donner les expressions issues des modélisations numériques (dont avec des valeurs numériques).
5. Calculer les valeurs de v_0 et α à partir des modélisations numériques de x et v_y (aide : $\frac{v_{0y}}{v_{0x}} = \tan\alpha$).

Activité 3 : Et du côté de l'énergie ?

Se positionner (une ou plusieurs bonnes réponses)

1. Dans le cas d'une chute verticale sans frottement, il y a conservation :

① de la vitesse
② de l'énergie cinétique
③ de l'énergie potentielle
④ de l'énergie mécanique
⑤ d'aucune de ces grandeurs

2. Le travail d'une force s'exprime grâce à la relation :

① $\vec{F}.\vec{v}$ ② $F \times v$ ③ $\vec{F}.\overrightarrow{AB}$ ④ $F \times AB$

On étudie de nouveau le mouvement précédent, dans le champ de pesanteur uniforme en considérant que le point d'arrivée est à la même altitude que le point de départ. On choisit encore de modéliser le mouvement sans tenir compte des frottements. On adopte cette fois-ci un regard différent : celui de l'énergie.

1. Rappeler l'expression de l'énergie potentielle de pesanteur du système en considérant que l'énergie potentielle est nulle lorsque y = 0.
2. Remplir le tableau suivant en respectant bien les consignes de la première ligne.

	Instant initial (y = 0) (mettre nulle, minimale ou maximale)	Pendant la montée (mettre ↗, ↘ ou →)	Au sommet de la trajectoire (mettre nulle, minimale ou maximale)	Pendant la descente (mettre ↗, ↘ ou →)	Instant final (y = 0) (mettre nulle, minimale ou maximale)
Altitude					
Vitesse					
Énergie cinétique $E_C = \frac{1}{2}mv^2$					
Énergie potentielle de pesanteur Ep					
Énergie mécanique Em = Ec + Ep					

Étude expérimentale :

À l'aide du pointage de l'activité précédente, faire calculer puis tracer les trois énergies en fonction du temps et vérifier ou corriger vos réponses. On choisira une masse arbitrairement égale à 1 kg (toutes les énergies étant proportionnelles à la masse, celle-ci ne modifie pas les variations).

Indiquer ci-dessous, les expressions saisies dans Regressi pour les énergies :

Ec = Ep = Em =

Après validation par le professeur, imprimer le graphe donnant les trois énergies en fonction du temps.

3. Justifier à l'aide du théorème de l'énergie cinétique la phrase suivante : « Entre deux points quelconques de la trajectoire, le travail effectué par le poids correspond à la quantité d'énergie qui change de forme au sein du système ».
4. Si les frottements n'étaient pas négligeables quelles seraient les variations d'énergie qui changeraient (par rapport à la situation sans frottement) : ΔEp ? ΔEc ? ΔEm ?
5. Justifier alors que les forces de frottements soient qualifiées de forces non conservatives.

Activité 4- Et dans un champ électrique ?

. . . .

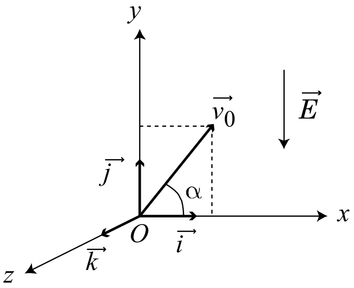
Cette activité a pour but d'étudier le mouvement de systèmes portant une charge électrique dans un champ électrostatique uniforme. Ces systèmes étant souvent des particules élémentaires, on parle de particule chargée, qu'on peut considérer ponctuelle ; on confond donc sa position avec celle de son centre d'inertie.

Partie 1- Description des conditions du lancer : premiers éléments de modélisation

Système étudié : . . . .

Référentiel d'étude : . . . ., supposé galiléen pour le mouvement étudié.

On suppose qu'à la date $t = 0$, la particule entre avec une vitesse initiale $\overrightarrow{v_0}$ dans la zone de champ électrostatique.



Le repère d'étude est choisi de la façon suivante :

- le plan (Oxy) contient les vecteurs $\overrightarrow{v_0}$ et $\vec{E}$.
- L'axe (Oy) est selon la direction de $\vec{E}$.
- L'axe (Oz) est tel que le repère (O, x, y, z) soit orthonormé direct.

Pour des raisons de commodité, on traitera du cas où le champ $\vec{E}$ est vertical. Si tel n'est pas le cas, il convient alors de changer l'orientation du repère. Comme pour la chute dans un champ de pesanteur, on peut repérer le vecteur vitesse initiale par sa norme et par l'angle α qu'il fait avec l'horizontale.

Partie 2- Utilisation de la 2^e loi de Newton

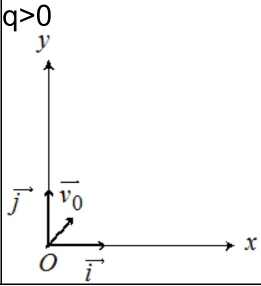
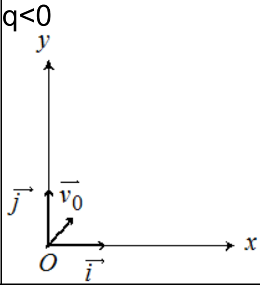
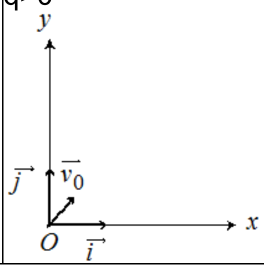
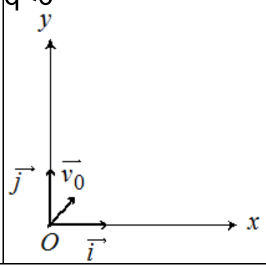
Les champs électrostatiques couramment utilisés ont des valeurs voisines de 10^4 V.m^{-1}.

La charge élémentaire vaut e = 1,6x10^{-19} C. Un électron a une charge q = –e et une masse m = 9,3 x 10^{-31} kg.

Hypothèse : on suppose que pour un électron présent dans un tel champ, le poids est négligeable devant la force électrostatique subie par l'électron.

1. Appliquer alors la deuxième loi de Newton à une particule de charge q dans le cas d'un champ électrostatique vertical et dirigé vers le bas.
2. En déduire les coordonnées du vecteur accélération de la particule.
3. Pour pouvoir exploiter les résultats de l'activité 2, par quelle expression convient-il de remplacer g ?
4. Compléter alors la colonne vide du tableau suivant, sans refaire les calculs de l'activité 2.

***Pour aller plus loin** : vérifier par un calcul l'hypothèse faite au début de cette étude (poids négligeable devant la force électrostatique).*

<table>
<tr><td>$\vec{E}$</td><td colspan="2">Vers le bas</td><td colspan="2">vers le haut</td></tr>
<tr><td>$\overrightarrow{a_G}$ $a_x(t)$ =
$a_y(t)$ =</td><td colspan="2"></td><td colspan="2">0
$\frac{qE}{m}$</td></tr>
<tr><td>$\overrightarrow{v_G(t)}$ $v_x(t)$ =
$v_y(t)$ =</td><td colspan="2"></td><td colspan="2">$v_0 \cos\alpha$
$\frac{qE}{m} t + v_0 \sin\alpha$</td></tr>
<tr><td>$\overrightarrow{OG}(t)$ x(t) =
y(t) =</td><td colspan="2"></td><td colspan="2">$v_0 \cos\alpha \ \times t$
$\frac{qE}{2m} t^2 + v_0 \sin\alpha \ \times t$</td></tr>
<tr><td>y en fonction de x
y(x) =</td><td colspan="2"></td><td colspan="2">$\frac{qE}{2m(v_0 \cos\alpha)^2} x^2 + \tan\alpha \ \times x$</td></tr>
<tr><td>Trajectoire</td><td>q>0
</td><td>q<0
</td><td>q>0
</td><td>q<0
</td></tr>
</table>

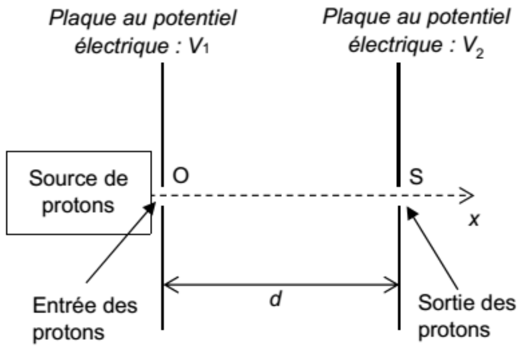
Vérifier vos réponses à l'aide de la simulation ***Particule chargée*** disponible sur www.prof-vince.fr

Activité 5 : Toujours plus vite !

Les accélérateurs linéaires sont utilisés de nos jours en médecine (radiothérapie et diagnostic médical par rayons X) mais aussi pour des analyses dans le domaine de l'art, de l'industrie automobile ou du nucléaire.
Les particules sont d'abord accélérées par un condensateur plan : c'est ce qu'on étudie dans cette activité.
Pour l'étude, on choisit de travailler avec les caractéristiques suivantes :
Données :
Particule accélérée : proton de masse m_{proton} = 1,67x10^{-27} kg et de charge q = + e = + 1,60x10^{-19} C ;

Accélération par un condensateur

Un proton entre dans le condensateur plan avec une vitesse initiale nulle en O. Une tension électrique positive $U = V_1 - V_2$ = 2,00 MV est appliquée entre les plaques du condensateur séparées d'une distance d = 10,0 cm. Le champ électrique $\vec{E}$ créé entre les plaques est supposé uniforme, dirigé dans le sens de l'axe Ox et de norme $E = U/d$. Les plaques sont percées en O et S pour laisser passer les protons. On étudie le proton dans le référentiel terrestre supposé galiléen. Le poids est considéré négligeable.

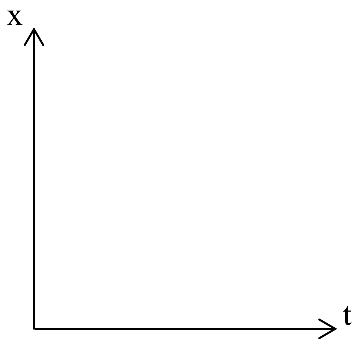
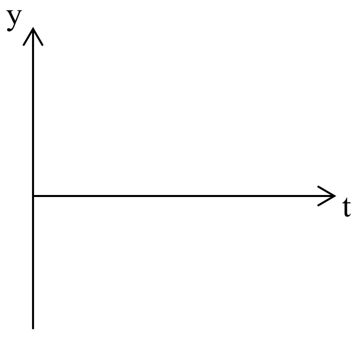
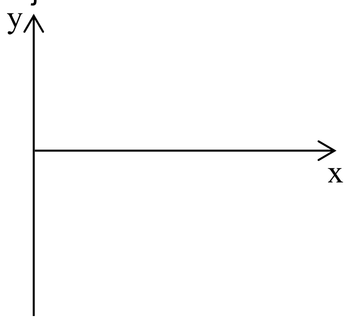
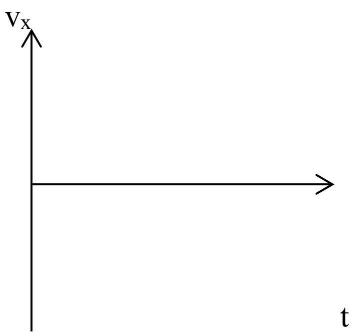
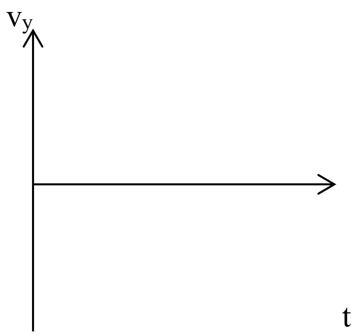
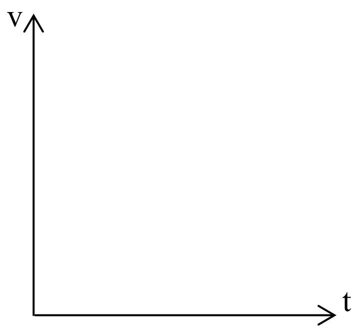
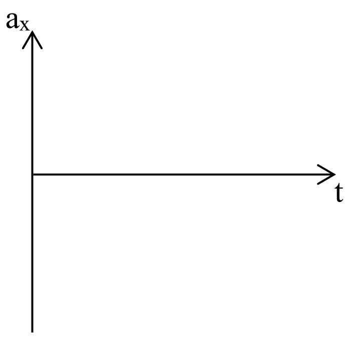
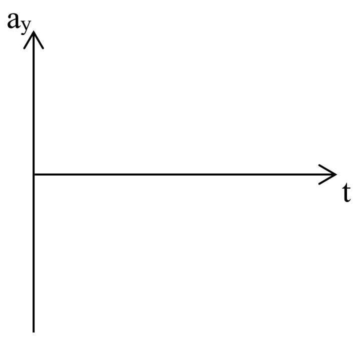
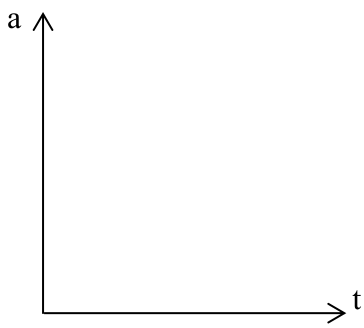


1. Donner les caractéristiques du champ $\vec{E}$ puis le représenter sur la figure ci-contre, ainsi que la force exercée, sans souci d'échelle.
2. Le proton entre dans le condensateur à t = 0 s sans vitesse initiale. En appliquant la 2e loi de Newton, donner l'expression de l'accélération du proton puis celle de la vitesse en fonction du temps.
3. En appliquant le théorème de l'énergie cinétique, déterminer la vitesse du proton v_1 quand il sort du condensateur à l'instant t_1.
4. Déduire des deux questions précédente la valeur de t_1.

Pour étudier le principe de l'accélérateur linéaire dans son ensemble, faire l'exercice 28 page 309, puis pour approfondir l'exercice 36 page 313.

Pour s'autoévaluer…

1. Compléter qualitativement les représentations graphiques ci-dessous en considérant un mouvement de chute libre dont la position initiale est l'origine du repère. On pourra considérer un lancer avec un angle de tir de 45°.

	Direction horizontale (Ox)	Direction verticale (Oy)	
Position			Trajectoire 
Vitesse			Norme du vecteur vitesse 
Accélération			Norme du vecteur accélération 

2. À l'aide des courbes tracées, indiquer si les propositions ci-dessous sont vraies ou fausses.
   a. La trajectoire est une parabole. ☐ vrai ☐ faux
   b. La valeur de l'accélération diminue puis augmente. ☐ vrai ☐ faux
   c. La vitesse est nulle au sommet de la trajectoire. ☐ vrai ☐ faux
   d. Le mouvement est uniforme horizontalement. ☐ vrai ☐ faux
   e. La vitesse de la balle est constante. ☐ vrai ☐ faux
   f. L'évolution de v_y permet de justifier que l'objet monte puis descend ☐ vrai ☐ faux