

Comment l'homme explique-t-il et relie-t-il les variations temporelles des grandeurs relatives à un système mécanique ?

I Eléments de cinématique

1) Introduction

(Re)lire « L'évolution des idées en physique » d'Einstein et Infeld p 5 à p 38

a) Le « mouvement » et son étude (ses causes notamment) font appel à deux notions bien distinctes, lesquelles ?

b) p 15 : quelle critique pouvez-vous faire du vocabulaire employé dans la phrase « Dans un cas, la force agit... Direction opposée » ?

c) Pourquoi un vecteur vitesse à une date t , pour un mobile donné, renferme tous les renseignements sur son mouvement à cette date ?

d) p 23 et suivante : quelles sont les caractéristiques d'un vecteur vitesse relativement à la trajectoire d'un mobile à une date t (propriété que vous avez déjà vue en SI l'année dernière) ?

e) p 21 et p 25 : comment qualifier scientifiquement les vecteurs en pointillés des dessins de ces pages ? Comment les construire ?

f) En divisant ces vecteurs en pointillés par un scalaire égal à Δt , durée mise pour « passer » d'un vecteur vitesse n°1 à un vecteur vitesse n°2, on obtient un nouveau vecteur colinéaire à celui en pointillé (puisque'on l'a multiplié par un scalaire). Quel nom pourrait-on donner à ce nouveau vecteur ?

g) En p 27 on parle de calcul infinitésimal. Vers quoi tend le vecteur de la question précédente quand l'intervalle de temps Δt devient « infinitésimal » (tend vers 0) ? Comment est appelé ce nouveau vecteur ?

2) Position d'un objet, trajectoire

a) Référentiel

Le mouvement d'un objet est déterminé par les différentes positions de cet objet à différentes dates (à une date donnée correspond une position).

Pour étudier le mouvement de l'objet, il faut choisir un solide de référence par rapport auquel on va étudier ce mouvement ainsi qu'une date de départ. On munit alors l'espace d'un repère d'espace (une origine, 3 axes gradués en m dans le SI) dans lequel l'objet de référence est fixe et qui permet d'obtenir les positions de l'objet étudié à un moment donné (par 3 coordonnées spatiales). On munit le temps d'un repère de temps (une origine des dates, c'ad un temps $t=0s$ et un axe temporel gradué en s dans le SI).

Choisir un repère d'espace et un repère de temps consiste à choisir un

Doc 1, doc A

b) Position d'un objet

La position d'un objet à une date est la donnée des trois coordonnées de l'espace du point position $M(x, y, z)$ de cet objet à cette date.

Doc 1 : en prenant $t = 0 s$ en M_1 , quelle est la position de M à 600 ms ? (attention à l'échelle : 1,0 cm sur le dessin correspond à 1,4 cm dans la réalité)

Doc A

Les fonctions $x(t)$, $y(t)$ et $z(t)$ sont les équations horaires du mouvement de l'objet.

La donnée des positions de l'objet équivaut à la donnée des coordonnées du vecteur position \overrightarrow{OM} de cet objet.

M a pour coordonnées $(x(t), y(t), z(t))$ donc \overrightarrow{OM}

Doc 1 : représenter en bleu les vecteurs \overrightarrow{OM}_{13} et \overrightarrow{OM}_{15}

Les coordonnées du vecteur position s'expriment en

c) Trajectoire

La trajectoire d'un objet est l'ensemble des positions prises par cet objet au cours du temps.

Doc 1

Doc A

3) Vecteur vitesse

a) Approche géométrique

Le vecteur position \overrightarrow{OM} varie au cours du temps.

Autour du point M_{14} , du point M_{13} au point M_{15} , le vecteur position a varié d'une quantité :

C'est la variation du vecteur position au point M_{14} . On représente ce vecteur avec son origine en M_{14} (doc 1)

$\overrightarrow{OM_{13}}$ et $\overrightarrow{OM_{15}}$ ont des coordonnées en m. Donc $\overrightarrow{OM_{15}} - \overrightarrow{OM_{13}}$ également. La norme de ce vecteur vaut :

En divisant $\overrightarrow{OM_{15}} - \overrightarrow{OM_{13}}$ par $t_{15} - t_{13}$ où $t_{15} - t_{13}$ correspond à la durée mise par le vecteur position \overrightarrow{OM} pour varier de $\overrightarrow{OM_{13}}$ à $\overrightarrow{OM_{15}}$ on obtient un nouveau vecteur correspondant à la variation du vecteur position par unité de temps, dont les coordonnées s'expriment par

et ont pour unité $m.s^{-1}$.

Doc 1 : dessiner en vert \vec{v}_{14} au point 14. Il faut d'abord calculer sa valeur :

Puis choisir une unité : $1cm = 7,5.10^{-2} m.s^{-1}$.

Ce nouveau vecteur est une approche du vecteur vitesse au point 14 noté \vec{v}_{14} .

Autre méthode plus rapide et à retenir afin d'obtenir le vecteur vitesse au point M_i : il faut remarquer que, d'après la relation de

Chasles, $\overrightarrow{OM_{20}} - \overrightarrow{OM_{18}} = \overrightarrow{M_{18}M_{20}}$

Doc 1 : calculer les vitesses instantanées aux points M_{19} et M_{21}

M_i	M_{19}	M_{21}
$M_{i-1}M_{i+1}$ (m)		
$v_i =$ (m.s ⁻¹)		

Dessiner en vert les vecteurs vitesses correspondants \vec{v}_{19} et \vec{v}_{21} en utilisant la même unité en utilisant le fait que

b) Définition

Le vecteur \vec{v}_{14} a été obtenu précédemment en prenant deux points très proches de M_{14} . Pour avoir la meilleure précision possible, il faudrait que ces deux points soient encore plus proches de M_{14} , c'est-à-dire que les positions M_{13} , M_{14} et M_{15} aient été enregistrées avec un écart de temps encore plus faible entre elles. On obtient, quand cet écart de temps tend vers 0, le vecteur vitesse en M_{14} :

Le vecteur vitesse au point M correspond à la variation instantanée du vecteur position par unité de temps et est défini par

Pour le point M_{14} ,

On note

\vec{v}_{14} est un vecteur.

On montre que dans un repère fixe du temps, si \overrightarrow{OM} a pour coordonnées

Doc A : calculer les coordonnées du vecteur vitesse en fonction du temps. Calculer ses coordonnées aux différentes dates et faire figurer ce vecteur sur la figure de la trajectoire en vert en utilisant une unité adaptée.

c) Propriétés et définitions

(voir Doc A et doc 1)

La vitesse du solide à la date t correspond à

- Ainsi, vecteur vitesse :
- sa norme.....
 - sa direction est à la trajectoire au point considéré.
 - son sens correspond

4) Vecteur quantité de mouvement

(voir aussi introduction en TP)

On définit pour un point matériel de masse m et de vecteur vitesse \vec{v} un vecteur « quantité de mouvement » noté \vec{p} et égal à

$$\vec{p} = m \cdot \vec{v}$$

Le vecteur quantité de mouvement d'un système est égal à la somme des vecteurs quantité de mouvement des points matériels qui le constituent.

En particulier, on montre que le vecteur quantité de mouvement d'un solide (constitué d'une multitude de points matériels) de masse m_{solide} et de centre d'inertie G est égal à

$$\vec{p}_{\text{solide}} = m_{\text{solide}} \cdot \vec{v}_G$$

De la même façon, si un système est formé par exemple de deux solides 1 et 2, alors le vecteur quantité de mouvement du système total est la somme des vecteurs quantité de mouvement des deux solides :

$$\vec{p}_{\text{systeme}} = \vec{p}_{\text{solide1}} + \vec{p}_{\text{solide2}} = m_1 \cdot \vec{v}_{G1} + m_2 \cdot \vec{v}_{G2}$$

Les coordonnées des vecteurs quantité de mouvement s'expriment en dans le SI.

5) Vecteur accélération

a) Approche géométrique

Le vecteur vitesse \vec{v} varie au cours du temps.

Autour du point M_{20} , du point M_{19} au point M_{21} , le vecteur vitesse a varié d'une quantité :

C'est la variation du vecteur vitesse au point M_{20} . On représente ce vecteur avec son origine en M_{20} (doc 1)

\vec{v}_{19} et \vec{v}_{21} ont des coordonnées en $m \cdot s^{-1}$. Donc les coordonnées de s'expriment également en $m \cdot s^{-1}$. La norme de ce vecteur vaut :

En divisant par où correspond à la durée mise par le vecteur vitesse \vec{v} pour varier de \vec{v}_{19} à \vec{v}_{21} , on obtient un nouveau vecteur correspondant à la variation du vecteur vitesse par unité de temps, dont les coordonnées s'expriment par

et ont pour unité

Doc 1 : dessiner en rouge au point 20. Il faut d'abord calculer sa valeur :

Puis choisir une unité : $1 \text{ cm} = 0,20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

Ce nouveau vecteur est une approche du vecteur accélération au point 20.

b) Définition

Le vecteur a été obtenu précédemment en prenant deux points très proches de M_{20} . Pour avoir la meilleure précision possible, il faudrait que ces deux points soient encore plus proches de M_{20} , c'est-à-dire que les positions M_{19} , M_{20} et M_{21} aient été enregistrées avec un écart de temps encore plus faible. On obtient alors deux vecteurs vitesse \vec{v}_{19} et \vec{v}_{21} puis le vecteur accélération \vec{a}_{20} en M_{20} :

Le vecteur accélération au point M correspond à la variation instantanée du vecteur vitesse par unité de temps et est défini par

Pour le point M_{20} ,

On note

..... est un vecteur.

On montre que dans un repère fixe du temps, si OM a pour coordonnées

Doc A : calculer les coordonnées du vecteur accélération en fonction du temps. Calculer ses coordonnées aux différentes dates et faire figurer ce vecteur sur la figure de la trajectoire en rouge en utilisant une unité adaptée.

6) Différents mouvements

a) Mouvement instantané du mobile en

Le mouvement en un point est caractérisé par :

-
-
-

Le mouvement en un point de la trajectoire du mobile est donc entièrement caractérisé par la donnée du vecteur vitesse car :

- la direction de la tangente à la trajectoire est
- le sens de parcours est
- la valeur de la vitesse correspond à



b) Définitions et propriétés

Un mouvement est dit plan si

Un mouvement est dit rectiligne si

Un mouvement est dit uniforme si

Un mouvement est dit accéléré si

Un mouvement est dit décéléré si

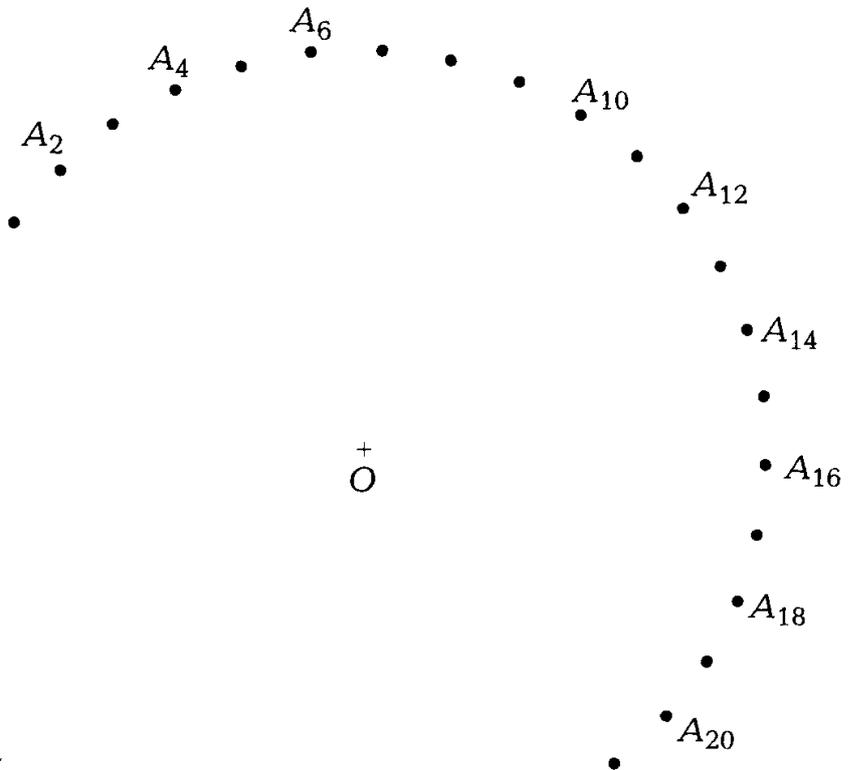
Un mouvement *qui est rectiligne* est dit, de plus, uniformément varié si

Exemples de mouvements

Document 2 à l'échelle 1 ($\tau = 40$ ms)



Document 3 à l'échelle 1 ($\tau = 20$ ms)



a) Qualifier les mouvements correspondant aux documents 2 et 3 précédents.

b) Dessiner les vecteurs vitesse aux points A_6 et A_8 pour les documents 2 et 3 en utilisant une échelle adaptée pour les vecteurs vitesse. Puis construire et faire figurer les vecteurs accélération au point A_7 sur les deux documents avec une échelle adaptée.

c) Que dire du vecteur accélération d'un mobile ayant un mouvement circulaire et uniforme ?

II Les lois de Newton

1) Première loi de Newton

Enoncé en français :

Dans certains dits galiléens par définition, le mouvement du centre d'inertie d'un système pseudo-isolé (dont les forces extérieures qui s'exercent sur lui se compensent) ne varie pas et réciproquement :

- si le centre d'inertie est immobile, il le reste
- si le centre d'inertie est déjà en mouvement, celui reste constant :
 - * la direction de ce mouvement est constante (le mouvement de G est rectiligne)
 - * le sens de ce mouvement est constant (pas de demi-tour)
 - * la vitesse de G est constante (le mouvement de G est uniforme)

Enoncé en langage mathématique :

$$\sum \vec{F}_{ext} \quad ; \quad \vec{v}_G \quad ;$$

Référentiels galiléens ou assimilés galiléens :

Extension aux systèmes constitués de plusieurs corps déformables ou pas : loi de conservation de la quantité de mouvement

Dans certains référentiels dits galiléens, le vecteur quantité de mouvement d'un système pseudo-isolé est un vecteur constant. Dans les exercices, définir le système et les corps dont il est constitué. S'assurer que ce système est pseudo-isolé, s'assurer que le référentiel d'étude (à préciser) est galiléen en le précisant. Faire apparaître les différents corps du système avec des indices lettres ou chiffres, et les 2 dates étudiées particulières avec des exposants « ' » ou « '' » par exemple. Ecrire alors que :

2) Deuxième loi de Newton

a) Approche expérimentale

Voir premier TP de mécanique (15/03/2004). Etre capable de refaire les constructions et les raisonnements
Résultats :

b) Enoncé général de la loi

Enoncé en français :

Enoncé en langage mathématique :

$$\sum \vec{F}_{ext} \quad ; \quad \vec{p}(= m \cdot \vec{v}_G) \quad ;$$

c) 2^{ème} loi de Newton dans le cas où la masse du système est constante :

Dans ce cas particulier mais très souvent rencontré :

Enoncé en français :

Enoncé en langage mathématique :

$$\sum \vec{F}_{ext} \quad ; \quad m \quad ; \quad \vec{a}_G \quad \text{ou} \quad \frac{d\vec{v}_G}{dt} \quad \text{ou} \quad \frac{d^2 \vec{OG}}{dt^2} \quad ;$$

d) Conséquences

a) *Interprétation de l'unité de force, le Newton (N)*

b) *Variation du mouvement et intensité de $\sum \overrightarrow{F}_{ext}$*

c) *Variation du mouvement et masse*

d) *La deuxième loi de Newton contient la première*

3) Troisième loi de Newton (rappels)

Enoncé en français

Enoncé en langage mathématique

$$\overrightarrow{F}_{A/B} :$$

$$\overrightarrow{F}_{B/A} :$$

III Mouvements plans

1) Propulsion par réaction

Pourquoi le canon de 75 présenté au musée du lycée recule-t-il lors de l'envoi d'un obus ? (Voir aussi TP sur la simulation d'une propulsion par réaction)

Deux corps A et B en contact initialement au repos forment un système pseudo isolé dans un référentiel considéré comme galiléen. A une certaine date, le corps B est éjecté du corps A avec une vitesse v_B . La quantité de mouvement du système étant initialement nulle (système immobile), elle le reste d'après la première loi de Newton puisque le système est pseudo isolé dans le référentiel assimilé galiléen. Les quantités de mouvement des corps A et B, après éjection, sont donc telles que :

$$\vec{p}'_{syst} = \vec{p}'_A + \vec{p}'_B = \vec{0} \text{ donc } \vec{p}'_A = \dots\dots\dots$$

C'est-à-dire que

On dit qu'il y a propulsion par réaction.

Citer un cas où cet effet n'est pas recherché et un cas où il est au contraire utilisé :

2) Mouvement dans un champ de pesanteur uniforme

a) Rappel et définition

Le champ de pesanteur, par exemple terrestre prend en compte :

-
-

Ce champ, en un point de l'espace est modélisé par un vecteur champ de pesanteur noté \vec{g} ayant pour caractéristiques :

Le champ de pesanteur terrestre peut être considéré uniforme si

b) Mouvement de chute libre dans le champ de pesanteur terrestre uniforme

Document : visionner la vidéo : <http://education.francetv.fr/physique-chimie/cinquieme/video/galilee-la-chute-des-corps>

Pourquoi Galilée peut-il être considéré comme le père des sciences physiques modernes ?

Qu'est ce que cherche à montrer Galilée ?

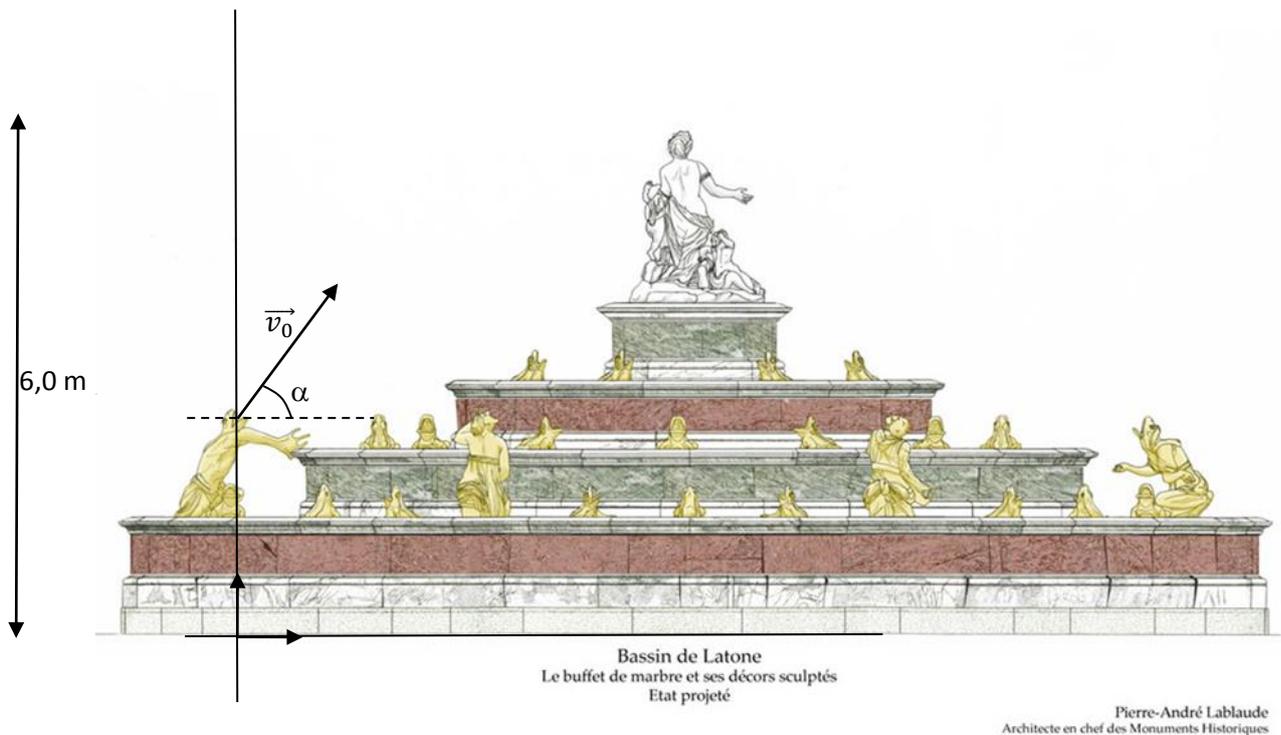
Définition d'une chute libre en physique : un objet est dit en chute libre s'il n'est soumis qu'à son poids \vec{P} .

Les résultats de Galilée étaient connus de Newton qui s'en est servi pour énoncer ses trois lois. Montrons que l'on retrouve bien les résultats de Galilée en utilisant les lois de Newton.

On cherche à connaître les équations du mouvement relatives à une boule de masse m lâchée sans vitesse initiale dans le champ de pesanteur terrestre supposé uniforme depuis une hauteur h en chute libre.

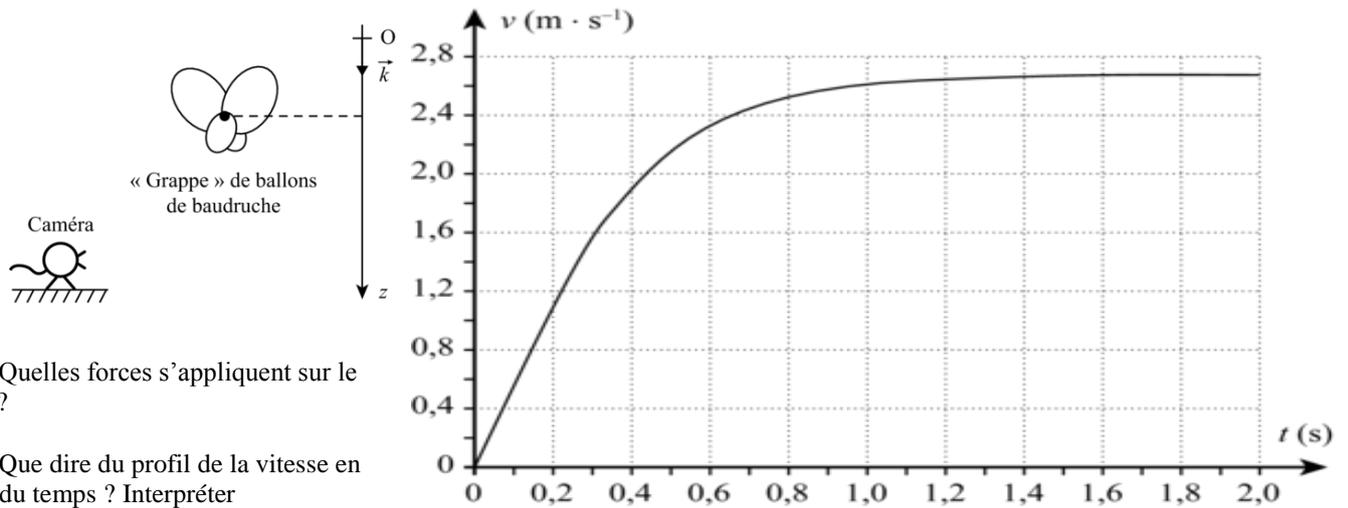
Mouvement de chute libre quelconque dans un champ de pesanteur uniforme

Documents : le bassin de Latone restauré, la nuit, et l'état projeté pour sa restauration



Vous êtes ingénieur fontainier au parc de Versailles et on vous demande de régler le débit d'eau (donc la vitesse v_0 d'éjection de l'eau) afin que le personnage qui se transforme en lézard sur la gauche crache un jet qui doit arriver aux pieds de Latone. Trouver pour cela la trajectoire adoptée par une goutte d'eau.

Vers le cas réel : exemple de chute d'une grappe de ballons de baudruche dans le champ de pesanteur uniforme.

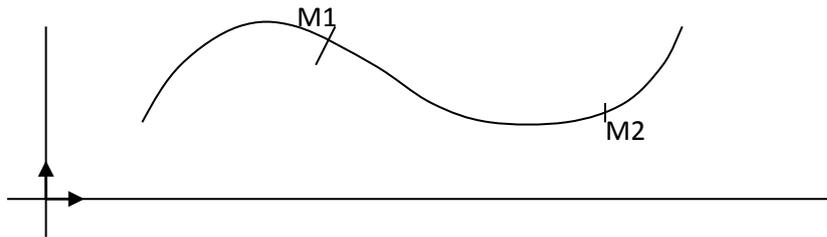


3) Mouvement des satellites et des planètes

a) De nouveaux outils de cinématique

i) Repère de Frenet

Les mouvements seront toujours plans.



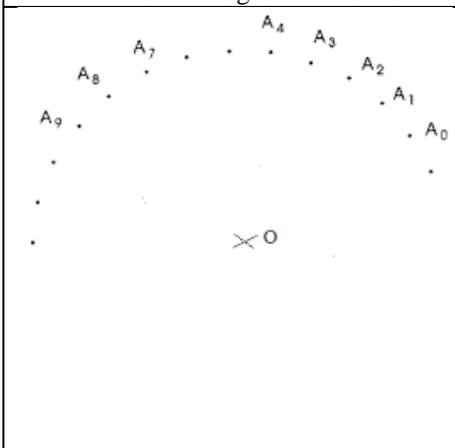
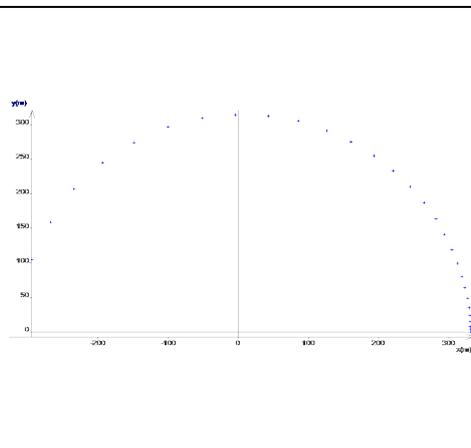
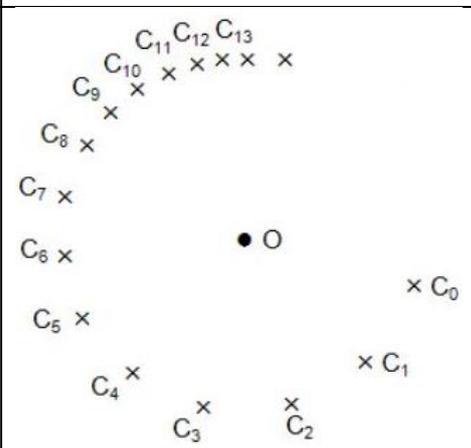
Position du mobile M par rapport au point O fixe, origine du repère donnée par les coordonnées du vecteur position OM :

	Repère cartésien / base cartésienne	Repère de Frenet / base de Frenet
repère	Fixe : Origine O fixe dans le temps 2 vecteurs de base (mvt plan) fixes, indépendants du temps	M..... Origine mobile, confondue à chaque temps t avec Deux vecteurs de base mobiles :
Vecteur vitesse	Vitesse	Le vecteur vitesse est tangent à la trajectoire donc :
Vecteur accélération		

ii) Applications à des cas particuliers à connaître parfaitement

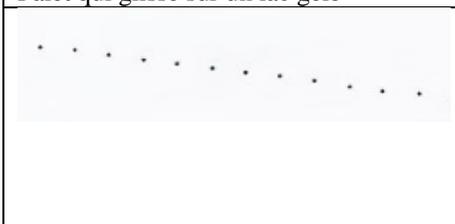
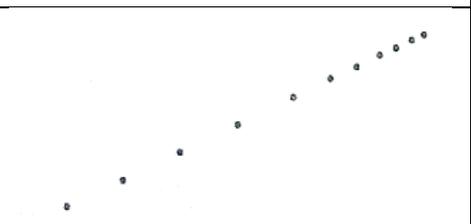
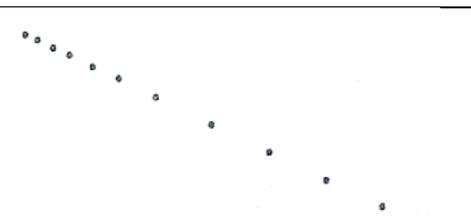
Les mouvements circulaires

Comment se simplifie l'expression du vecteur accélération dans la base de Frenet ?

Mouvement circulaire uniforme	Mouvement circulaire accéléré	Mouvement circulaire décéléré
Objet sur les parois d'une centrifugeuse tournant à vitesse angulaire constante	Caillou dans une fronde qui va être lâché	Objet sur un manège qui s'arrête de tourner
		
Coordonnées du vecteur accélération	Coordonnées du vecteur accélération	Coordonnées du vecteur accélération
Conclusion	Conclusion	Conclusion

Les mouvements rectilignes

Comment se simplifie l'expression du vecteur accélération dans la base de Frenet ?

Mouvement rectiligne uniforme	Mouvement rectiligne accéléré	Mouvement rectiligne décéléré
Palet qui glisse sur un lac gelé		
		
Coordonnées du vecteur accélération	Coordonnées du vecteur accélération	Coordonnées du vecteur accélération
Conclusion	Conclusion	Conclusion

iii) De nouveaux référentiels

Le référentiel terrestre (solide de référence = Terre) ne peut plus être assimilé galiléen pour les durées correspondant aux mouvements des astres : les première et deuxième lois de Newton ne seraient plus valides.

Le référentiel héliocentrique

Le solide de référence est imaginaire : il serait composé du centre du Soleil et de trois bras dirigés vers trois étoiles très lointaines et considérées comme fixes.

Le repère cartésien qu'on lui associe généralement a les caractéristiques suivantes :

Origine : le centre du Soleil

Axes : passant par le centre du Soleil et dirigés vers les trois étoiles fixes

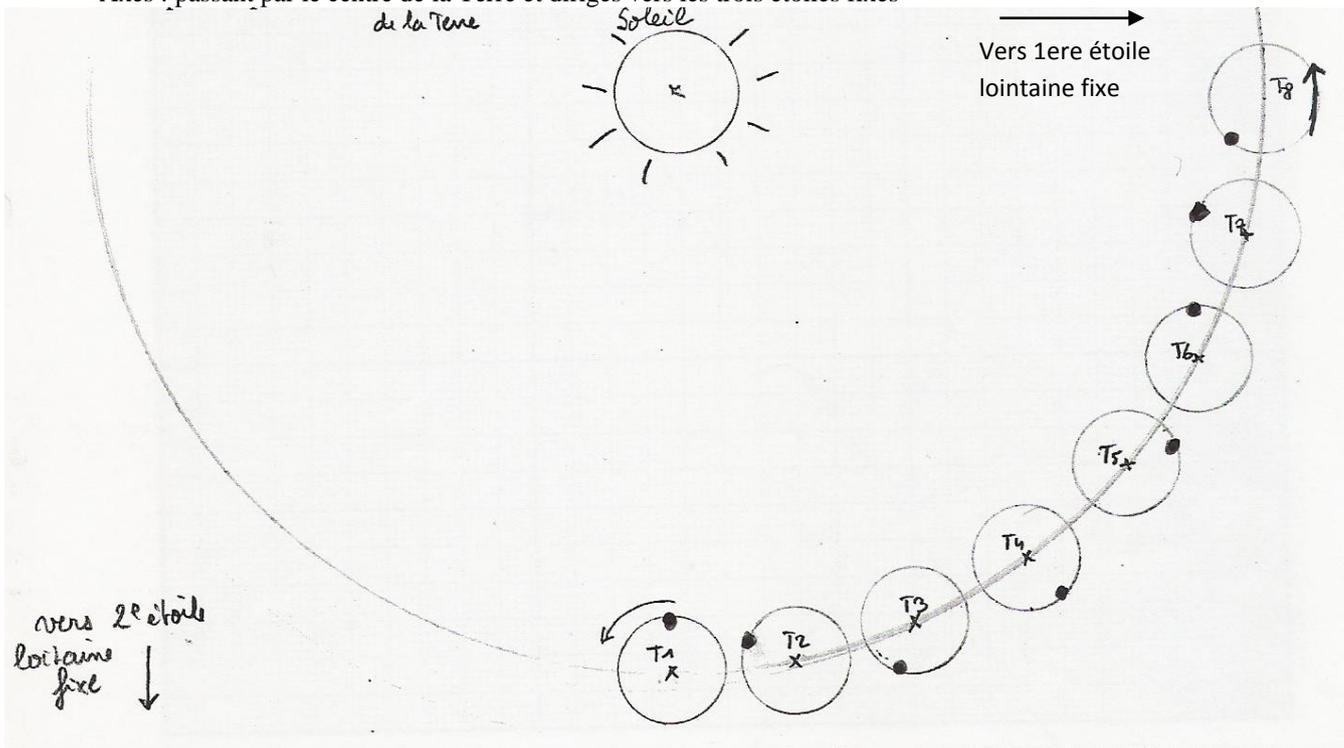
Le référentiel géocentrique (et par extension « planétocentrique »)

Le solide de référence est imaginaire : il serait composé du centre de la Terre et de trois bras dirigés vers trois étoiles très lointaines et considérées comme fixes qui sont les mêmes que celles du repère héliocentrique.

Le repère cartésien qu'on lui associe généralement a les caractéristiques suivantes :

Origine : le centre du Soleil

Axes : passant par le centre de la Terre et dirigés vers les trois étoiles fixes



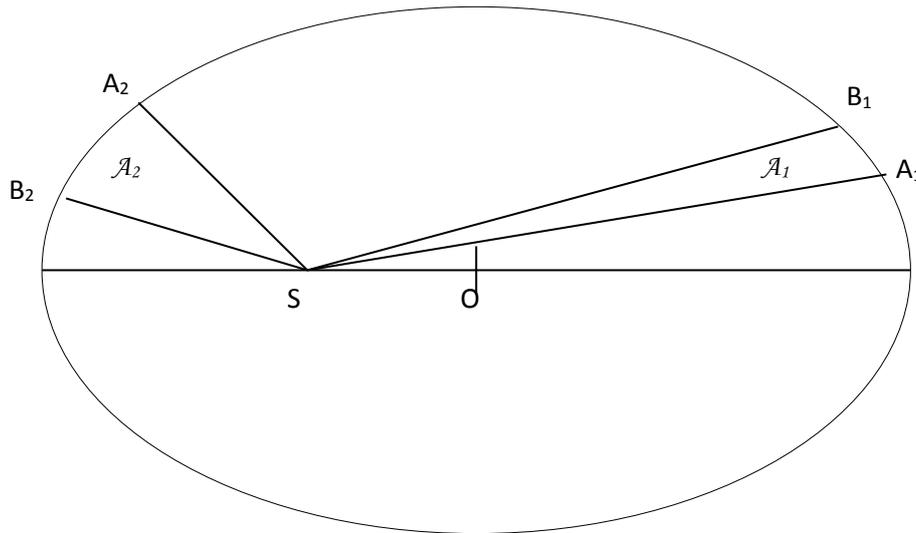
Le référentiel héliocentrique peut être assimilé galiléen pour des durées comme celles du mouvement de révolution des planètes autour du Soleil.
 Le référentiel géocentrique peut être assimilé galiléen pour des durées comme celles du mouvement de révolution des satellites autour de la Terre.

Attention à ne pas confondre le mouvement de révolution et le mouvement de rotation propre et attention à bien définir ces deux mouvements. En particulier, qui dit mouvement, dit système et choix d'un référentiel qu'il faut préciser à chaque fois ! Prenons l'exemple de la Terre.

Le centre de la Terre est dans le référentiel et dans le référentiel
 Mais il est animé d'un mouvement de autour du Soleil dans le référentiel dont
 la durée est appelée égale à jours
 La Terre est dans le référentiel . Mais elle est animée d'un mouvement de
 dans le référentiel . La durée d'une rotation propre dans le référentiel
 géocentrique s'appelle . Un jour sidéral =
 Il ne faut pas confondre cette durée avec le jour solaire correspondant à la durée séparant 2 passages successifs du Soleil au méridien d'un même lieu sur Terre. Un jour solaire =

b) Les trois lois de Képler

Képler, après des années de travail, énonce trois lois empiriques sur le mouvement des planètes dans le référentiel héliocentrique, d'après les relevés nombreux et précis de son maître Tycho Brahé, célèbre astronome danois du XVII^{ème} siècle.



a) Première loi ou loi des orbites

Un cas particulier de trajectoire elliptique :

b) Deuxième loi ou loi des aires

Conséquence :

Cas particulier de la trajectoire circulaire :

c) Troisième loi ou loi des périodes

Cas particulier de la trajectoire circulaire :

Application :

La Terre tourne à une distance $R_{\text{Terre}} = 1,50 \cdot 10^8$ km du Soleil. Jupiter a une période de révolution de $37,4 \cdot 10^7$ s. En déduire le demi grand axe de l'ellipse de Jupiter autour du Soleil.

4) Mouvement d'une particule chargée dans un champ électrique uniforme

a) Rappels

Exemple d'obtention d'un champ électrique uniforme

Force exercée sur une particule chargée de charge q

b)