Chapitre Mécanique M-1- Cinématique du point

***** *Le mouvement est une notion très relative* *******

A- Espace et temps d'un observateur
Référentiel
Repère, coordonnées cartésiennes
Décompositions d'un vecteur
Cas du repérage géographique (latitude, longitude, altitude)
B- Mouvement d'un point matériel
Trajectoire. Vitesse et accélération
Mouvement uniforme, accéléré ou retardé selon le signe de $\vec{a}.\vec{v}$.
Expression de $\vec{v}$ et $\vec{a}$ en cartésiennes

C- Mouvements particuliers
Mouvement rectiligne uniforme
Mouvement rectiligne uniformément accéléré ou retardé
Mouvement de vecteur accélération constante
D- Changement de référentiel, composition des mouvements
Cas général et cas particulier de deux référentiels en translation rectiligne. Notion d'entraînement
Composition des vitesses
Invariance de l'accélération dans deux référentiels en translation rectiligne uniforme.
Invariance de la vitesse de la lumière par changement de référentiel, limites de la mécanique classique

A- Espace et temps d'un observateur

1- Référentiel

Un **référentiel** $\mathcal{R}$ définit : - ***l'ensemble des points fixes* pour un observateur**
- ***l'échelle de temps* associée à cet observateur**

C'est une **notion physique**. En mécanique classique, le temps est absolu, le même dans tous les référentiels. Il n'est donc pas utile de le préciser à chaque fois. On choisira toujours le référentiel le mieux adapté au problème. Voici les exemples les plus courants :

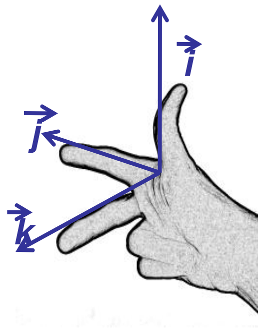
- ***Terrestre*** **:** *le sol et les murs sont immobiles. C'est le plus intuitif (à considérer si l'énoncé ne précise pas). Utile pour les mouvements habituels à notre échelle. Dans ce référentiel, le Soleil fait un tour par jour, la Terre est immobile.*
- ***Géocentrique*** **:** *le centre de la Terre et les étoiles lointaines sont fixes. Utile pour le mouvement des satellites terrestres. Dans ce référentiel, le sol fait un tour par jour et le Soleil un tour par an.*
- ***Héliocentrique (de Képler)*** *: le Soleil (considéré comme ponctuel…) et les étoiles lointaines sont fixes. Utile pour le mouvement des planètes. Dans ce référentiel, la Terre fait un tour par an.*
- ***De Copernic*** *: le centre du système solaire et les étoiles lointaines sont fixes. C'est le référentiel galiléen de référence, peu utile en pratique.*
- ***Référentiel lié à un véhicule en mouvement*** *: par exemple dans le référentiel lié à un train en marche, les banquettes du train sont immobiles mais les arbres et la voie ferrée sont en mouvement.*

!!IMPORTANT!! : La notion de vitesse (et donc de mouvement, trajectoire ou accélération) n'a de sens que dans un référentiel donné. **Tout mouvement est relatif à un référentiel.**

2- Repère

Une fois le référentiel choisi, les positions, trajectoires et vecteurs sont précisés grâce à un repère. C'est une **notion mathématique**, un outil. On note ici (par commodité) les vecteurs en gras.

Dans l'espace, un repère R est défini par une origine O et trois vecteurs de base ($\vec{\boldsymbol{i}}, \vec{\boldsymbol{j}}, \vec{\boldsymbol{k}}$)qui donnent les directions des axes de référence. L'origine et les axes sont fixes dans le référentiel.



On note R le repère : (O, $\vec{\boldsymbol{i}}, \vec{\boldsymbol{j}}, \vec{\boldsymbol{k}}$)

On choisit généralement un **repère orthonormé direct** :

- les vecteurs de base sont orthogonaux
- de norme unité
- dans le sens direct (règle de la **main droite**)

Remarque 1 : la donnée d'un repère suffit en pratique à préciser le référentiel choisi puisque les trois axes et l'origine sont immobiles. On peut noter directement le référentiel R : (O, $\vec{\boldsymbol{i}}, \vec{\boldsymbol{j}}, \vec{\boldsymbol{k}}$) ce qui donne un point et trois directions fixes.

Remarque 2 : un repère est fixé dans un référentiel donné mais dans ce référentiel, on peut définir une infinité de repères (il convient donc de choisir le plus judicieux pour l'étude)

3- Coordonnées cartésiennes

Les vecteurs de bases s'appellent selon les cas ($\vec{i}$, $\vec{j}$, $\vec{k}$) ou ($\vec{u_x}$, $\vec{u_y}$, $\vec{u_z}$)

Un point M a trois coordonnées : M (x , y , z)

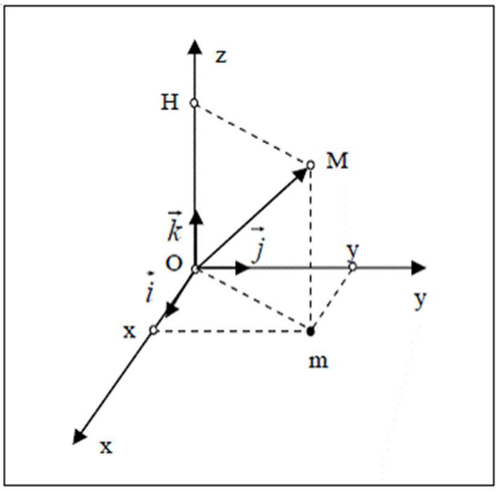
Le vecteur position s'écrit

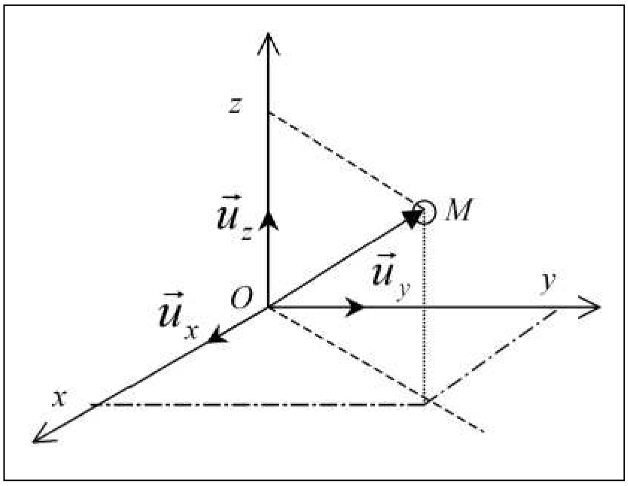
Chaque coordonnée est obtenue en projetant le vecteur position sur des axes

x =

y =

z =





Décomposition d'un vecteur $\vec{F}$ dans un plan

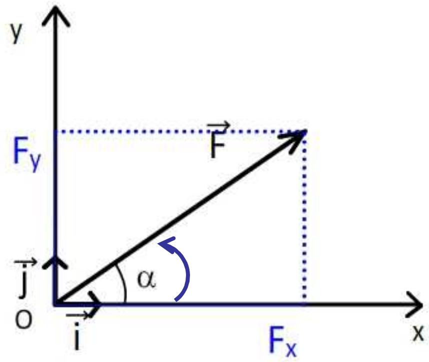
Si α est *l'angle orienté* entre le vecteur $\vec{i}$ et le vecteur $\vec{F}$

On peut noter **F = || $\vec{F}$ || la norme**

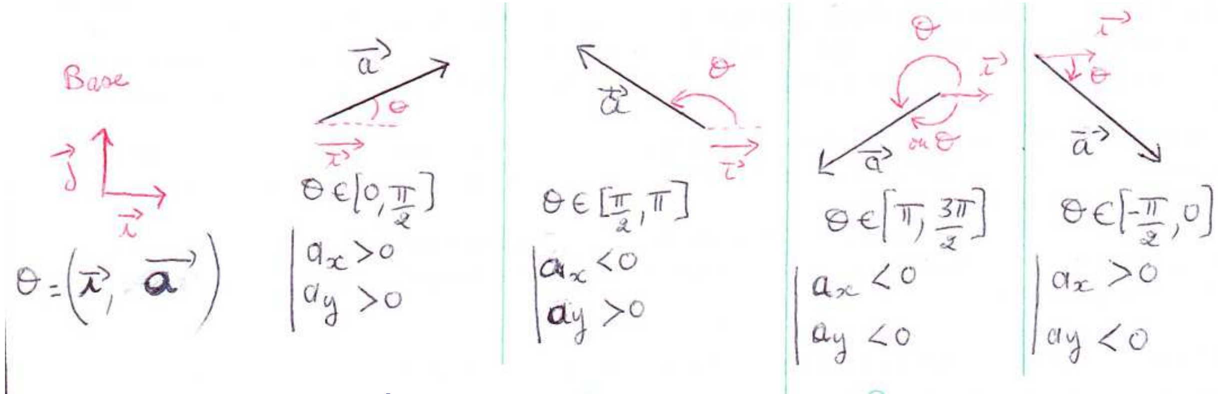
Les coordonnées du vecteur $\vec{F}$ sont alors

$$\begin{cases} F_x = F \cdot \cos\alpha \\ F_y = F \cdot \sin\alpha \end{cases}$$

On peut écrire $\vec{F} = F_x \cdot \vec{i} + F_y \cdot \vec{j}$

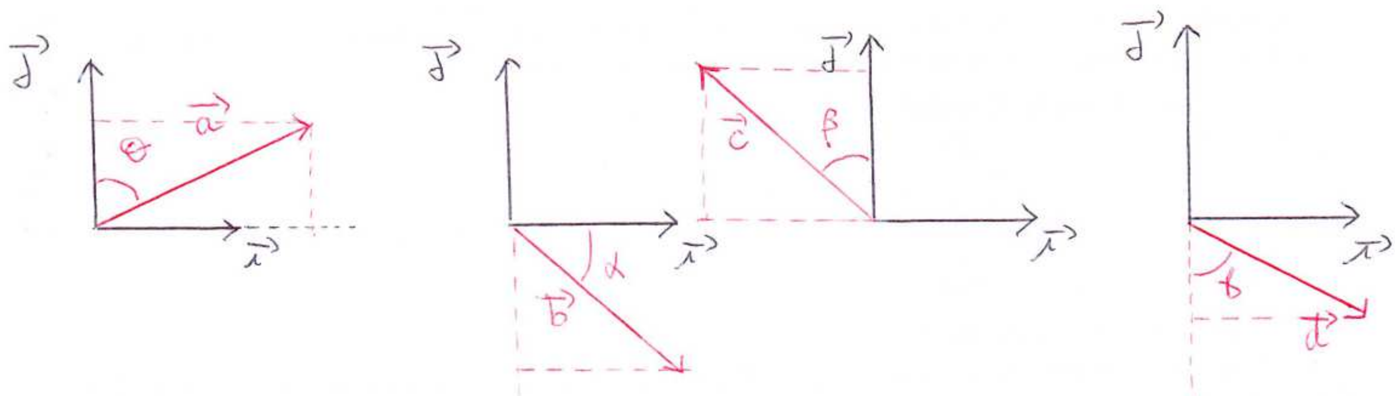


Sur le schéma ci-contre, α est compris entre 0 et 90°. Dans ce cas, les deux coordonnées sont positives. Les signes sont différents selon la valeur de l'angle. Ci-dessous, les différentes orientations d'un vecteur :



Dans tous les cas :
$$\begin{cases} a_x = a.\cos(\theta) \\ a_y = a.\sin(\theta) \end{cases}$$

Attention, en mécanique, on définit souvent un angle non orienté, compris entre 0 et 90° par rapport à un des axes (pas forcément Ox). *Sur les exemples ci-dessous, donnez les coordonnées des vecteurs en rouge en fonction de leur norme et de l'angle non orienté qui apparait sur la figure.*



A retenir absolument: pour un vecteur de norme **a**, qui fait un angle α par rapport à un des axes, les coordonnées sont du type :

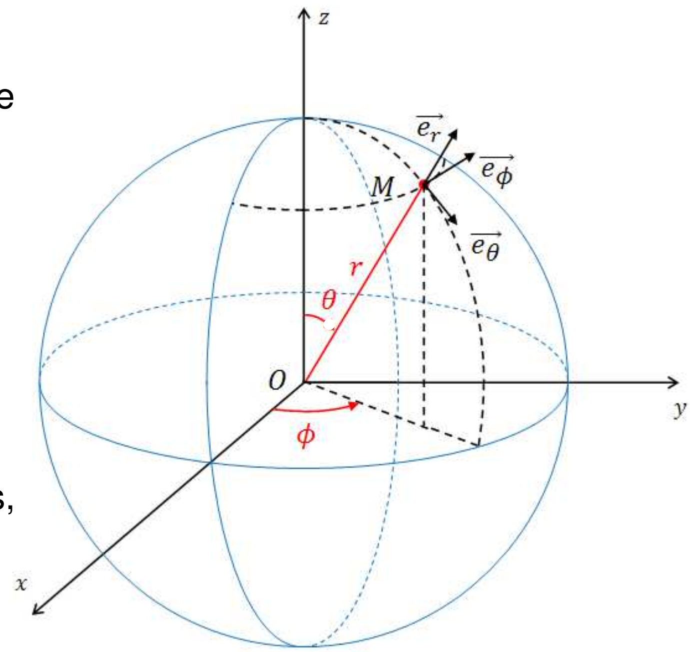
a_x ou a_y = **± a. cos (α)** ou **± a.sin (α)**

- ✓ Analyser le signe de chaque composantes en fonction de l'orientation du vecteur
- ✓ Attribuer « sin » ou « cos » à la **bonne** composante *(il y en a un de chaque)*
- ✓ Vérifier que l'attribution est bonne pour des valeurs particulières de l'angle : α =0 ou 90°

4- Culturel autres coordonnées : les coordonnées sphériques (quand les cartésiennes sont mal adaptées)

On part toujours d'un repère cartésien précédent. On considère un point M(x, y, z). On privilégie aussi l'axe Oz.
H est le projeté orthogonal de M sur le plan xOy.
On note (r, θ, ϕ) les coordonnées sphériques de M avec :

- r = distance OM = distance entre M et O.
- $\theta = (\vec{k}, \overrightarrow{OM})$ angle non orienté
- $\phi = (\vec{i}, \overrightarrow{OH})$ angle orienté dans le plan xOy



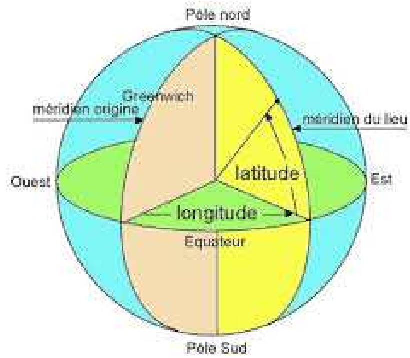
r définit une sphère de centre O
θ définit un cône de révolution autour de Oz
ϕ définit un ½ plan à partir de Oz
(θ, ϕ) sont les coordonnées angulaires, définissent une direction à partir de O

Relations entre les coordonnées

- $r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$
- $z = r.\cos\theta$
- $x = OH.\cos\phi = r.\sin\theta.\cos\phi$
- $y = OH.\sin\phi = r.\sin\theta.\sin\phi$

❑ *Cas du repérage géographique sur Terre : (latitude, longitude et altitude)*

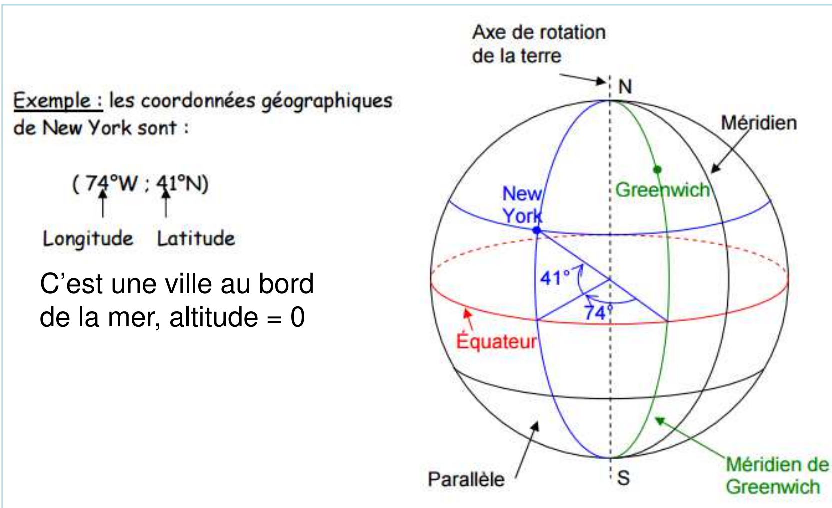
Ce sont des coordonnées sphériques, mais avec des conventions particulières de notation.



- l'axe Oz est l'axe Nord-Sud. Le plan xOy est le plan équatorial, avec l'axe Ox qui passe par le méridien de Greenwich
- L'altitude h est la distance à la surface terrestre. Elle équivaut à avoir r avec r = R + h
- *La latitude est un angle compté à partir de l'Equateur*. Elle équivaut à θ.

Dans l'hémisphère Nord, on la note λ_N avec $\lambda_N = 90 - \theta$ en °.
Dans l'hémisphère Sud, on la note λ_S avec $\lambda_S = \theta - 90$ en °.

- La longitude équivaut à ϕ . On lui met un indice *W* ou *E* selon que le point est à l'Ouest ou à l'Est du méridien de Greenwich



B- Mouvement d'un point matériel (dans $\mathcal{R}$ fixé)

1- Trajectoire

Soit un point **M** en mouvement dans le référentiel $\mathcal{R}$. L'ensemble des points **M(t)** constitue sa **trajectoire**. C'est une **courbe orientée** selon **t** croissant.

Cas particuliers :

- Si la trajectoire est portée par une droite, le mouvement est rectiligne.
- Si la trajectoire est portée par un cercle, le mouvement est circulaire.
- Si la trajectoire est portée par une parabole, le mouvement est parabolique.

2- Vitesse (dans un référentiel fixé !)

❑ Vecteur vitesse, vitesse instantanée

Sur un déplacement, on connait la **vitesse moyenne** $\underline{v}$:

$$\underline{v} = \frac{\text{longueur parcourue}}{\text{temps de parcours}} \qquad (\text{USI : m.s}^{-1})$$

En chaque point de la trajectoire, on peut définir un vecteur vitesse à l'instant t, c'est la vitesse instantanée, qu'on appellera « vitesse » tout court par la suite : $\vec{\mathbf{v}}$

- Sens et direction du déplacement, tangent à la trajectoire
- Norme $\mathbf{v} = \|\vec{\mathbf{v}}\|$

Attention, **ne pas confondre le vecteur et sa norme.** *(Velocity ≠ Speed)*

Quand on parle de « vitesse » tout court et que c'est une valeur numérique, il s'agit

❑ Vecteur déplacement élémentaire

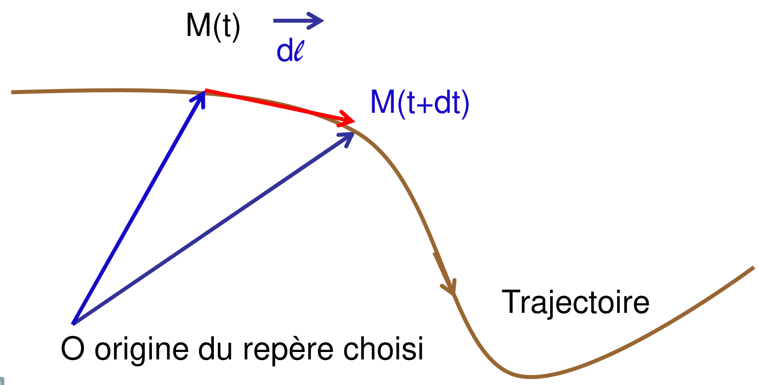
Pendant dt, le point se déplace de **M(t)** à **M(t + dt)**

Le déplacement élémentaire est

$$\overrightarrow{d\ell} = \overrightarrow{\mathbf{M(t)M(t+dt)}}$$

Par la relation de Chasles, on peut introduire un point fixe O :

$$\overrightarrow{d\ell} = \overrightarrow{\mathbf{M(t)O}} + \overrightarrow{\mathbf{OM(t+dt)}}$$



$$\boxed{\overrightarrow{d\ell} = \overrightarrow{\mathbf{OM(t+dt)}} - \overrightarrow{\mathbf{OM(t)}} = \overrightarrow{\mathbf{dOM}}}$$

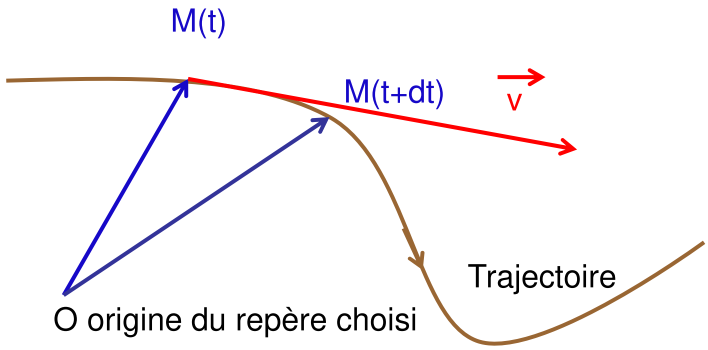
notation à connaitre !!

*Ce vecteur dépend-il de la position de l'origine **O**?*

des axes du repère?

❑ Vecteur vitesse

Le vecteur vitesse est colinéaire à $\vec{d\ell}$ et dans le même sens.



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

Ce vecteur ne dépend pas du repère choisi mais seulement du référentiel. C'est **la dérivée par rapport à t du vecteur déplacement**. *(Eh oui, la dérivée d'un vecteur est un vecteur)*

3- Accélération (toujours dans un référentiel fixé !)

Le **vecteur accélération** $\vec{a}$ est la dérivée par rapport à t du **vecteur vitesse**. C'est donc la dérivée seconde du vecteur position

$$\boxed{\vec{a} = \frac{\vec{v}(t+dt) - \vec{v}(t)}{dt} = \frac{d\vec{v}}{dt} =}$$

Attention, **ne pas supprimer la flèche** !! La norme **a** n'est pas la dérivée de la norme **v**

La norme **a** = || $\vec{a}$ || est homogène à une vitesse sur un temps *USI : **a** en m.s^{-2}*

4- Orientation des vecteurs vitesse et accélération selon le mouvement

- Si **la norme de la vitesse est constante**, on parle de mouvement **uniforme.** *Ca ne veut pas dire que le vecteur vitesse est constant, il peut changer d'orientation*.
- Si **la norme de la vitesse augmente**, on parle de mouvement **accéléré**
- Si **la norme de la vitesse diminue**, on parle de mouvement **retardé ou décéléré**

Attention : ne jamais dire qu'un « vecteur augmente ou diminue », c'est un non sens !

Rappel sur les produits scalaires : $\vec{v}\,.\,\vec{v} = ||\,\vec{v}\,||^2 = v^2$

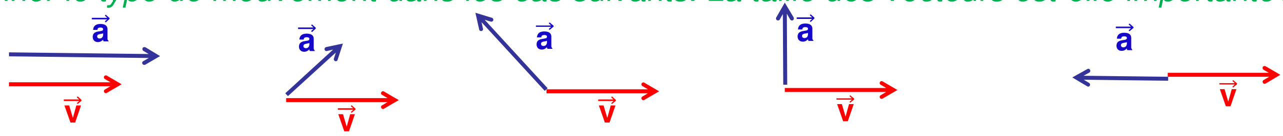
v et **v²** évoluent dans le même sens. Exprimons d'abord la dérivée de **v²**

$$\frac{dv^2}{dt} = \frac{d(\vec{v}\,.\,\vec{v})}{dt} = \frac{d(\vec{v})}{dt}\,.\,\vec{v} + \vec{v}\,.\,\frac{d(\vec{v})}{dt} = 2\,\frac{d(\vec{v})}{dt}\,.\,\vec{v} = 2\,\vec{a}\,.\,\vec{v}$$

Le signe de cette dérivée est donc le même que celui de $\vec{a}\,.\,\vec{v}$. Si on note ϕ l'angle entre les deux vecteurs, on a $\vec{a}\,.\,\vec{v} = a.\ v.\ \cos\phi$

- Si mouvement **uniforme**, $\vec{a}\,.\,\vec{v} = 0$ donc $\vec{a} = \vec{0}$ ou $\vec{v} = \vec{0}$ *(immobile)* ou $\vec{a} \perp \vec{v}$ ⬄ $\phi = 90°$
- Pour un mouvement **accéléré**, $\vec{a}\,.\,\vec{v}$ **> 0** donc ϕ € [0, 90°[
- Pour un mouvement **décéléré,** $\vec{a}\,.\,\vec{v}$ **< 0** donc ϕ €] 90°, 180°[

Donner le type de mouvement dans les cas suivants. La taille des vecteurs est-elle importante?



5- Expressions en coordonnées cartésiennes

Le vecteur déplacement s'écrit au choix :

$$\overrightarrow{\mathrm{OM}} = x\,\vec{u}_x + y\,\vec{u}_y + z\,\vec{u}_z \quad \text{ou} \quad \overrightarrow{OM} = x\vec{i} + y\vec{j} + z\vec{k}$$

On dérive / t pour obtenir le vecteur vitesse

$$\begin{aligned}\vec{v} &= \frac{\mathrm{d}\overrightarrow{\mathrm{OM}}}{\mathrm{d}t} \\ &= \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(x\,\vec{u}_x + y\,\vec{u}_y + z\,\vec{u}_z\right) \\ &= \frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}\,\vec{u}_x + \frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t}\,\vec{u}_y + \frac{\mathrm{d}z}{\mathrm{d}t}\,\vec{u}_z\end{aligned}$$

soit

$\vec{\mathbf{v}}$=

$$\vec{\mathbf{v}}\ \left|\ \begin{array}{l} v_x = \\ v_y = \\ v_z = \end{array}\right.$$

On dérive une fois de plus pour obtenir l'accélération

$$\vec{\mathbf{a}} = \ddot{x}\,\vec{u}_x + \ddot{y}\,\vec{u}_y + \ddot{z}\,\vec{u}_z$$

$$\vec{\mathbf{a}}\ \left|\ \begin{array}{l} a_x = \\ a_y = \\ a_z = \end{array}\right.$$

Exemple. On considère un mouvement plan tel que les lois horaires sont :

$x(t) = b.\cos(\omega t)$ et $y(t) = b.\sin(\omega t)$ avec b et ω des constantes positives

1- Donner les dimensions et unités SI des constantes

2- Donner les coordonnées et la norme de la vitesse. Commenter

3- Donner les coordonnées et la norme de l'accélération. Commenter

4- Donner l'équation de la trajectoire (en éliminant t). Commenter

C- Mouvements particuliers (à savoir traiter)

1- Mouvement rectiligne uniforme

C'est le mouvement <u>le plus simple</u>, le vecteur vitesse est constant.
Meilleur choix de coordonnées : un axe, par exemple Ox, colinéaire à $\vec{v}$ et dans le même sens. La trajectoire est sur l'axe, le vecteur accélération est nul.

Alors $v_x = v > 0$

Attention, l'axe est parfois orienté en sens inverse. En particulier, l'axe Oz en mécanique est en général un axe vertical <u>vers le haut</u>. Pour un mouvement vertical <u>de descente</u>, on aura alors $v_z < 0$ et la norme v sera $v = - v_z$. Bien regarder le problème !!

La position x(t) s'obtient par

x(t) =

On a besoin de la position initiale x_0 à t = 0 x(t) =

si on a choisi la position initiale comme origine de l'axe : x_0 =
et x(t) =

2- Mouvement rectiligne uniformément accéléré ou décéléré

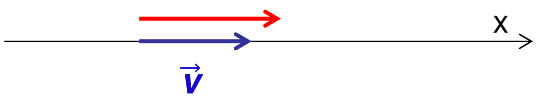
Alors le <u>vecteur accélération</u> $\vec{a}$ est constant, de norme constante a.
Meilleur choix de coordonnées : un axe, par exemple Ox, colinéaire à $\vec{v}$ et dans le même sens. On peut noter x_0 la position initiale et v_0 la vitesse initiale. La trajectoire est sur l'axe, le vecteur accélération est colinéaire à l'axe.
Schéma :

$a_x = +a$ si c'est accéléré et $a_x = - a$ si décéléré

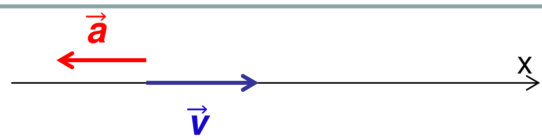
On obtient v_x en intégrant a_x : v_x (t) = *(1)*

Puis la position en intégrant v_x : x (t) = *(2)*

Si $a_x > 0$, v_x est croissante, v augmente, mouvement uniformément accéléré
Si $a_x < 0$, v_x est décroissante, v diminue , mouvement uniformément retardé



Mouvement rectiligne accéléré
a = + dv/dt
(= **<u>seul cas</u>** où cette formule « marche »)



Mouvement rectiligne retardé
a = - dv/dt

Relation entre position et vitesse :

On peut éliminer t de *(1)* et reporter dans *(2)* :

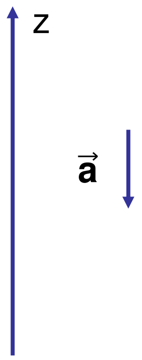
(1) t = puis *(2)*

Si l'origine est la position initiale et que la vitesse initiale est nulle :

à retrouver si besoin

Attention aux signes, si l'axe est orienté en sens inverse de la vitesse.

A t = 0, la vitesse est nulle et z_0=h. Exprimer v_z, v et z en fonction de t et a



3- Mouvement de vecteur accélération constante

On considère un point de vitesse initiale $\overrightarrow{v_0}$ et d'accélération constante $\vec{a}$.
On doit d'abord choisir un repère. Le plan est muni d'un repère xOy. Il parait judicieux de choisir un des axes colinéaire au vecteur accélération. On peut aussi prendre un axe qui contient la position initiale. L'orientation du vecteur vitesse initiale est en revanche quelconque, dans le plan xOy

Schéma :

Conditions initiales : M_o $\overrightarrow{v_0}$ Accélération :

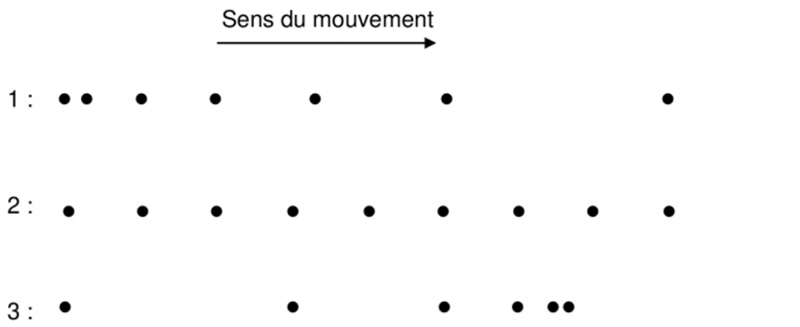
Vecteur vitesse :

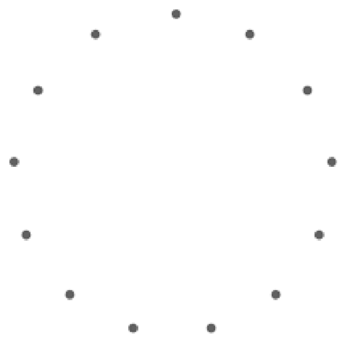
Position, lois horaires :

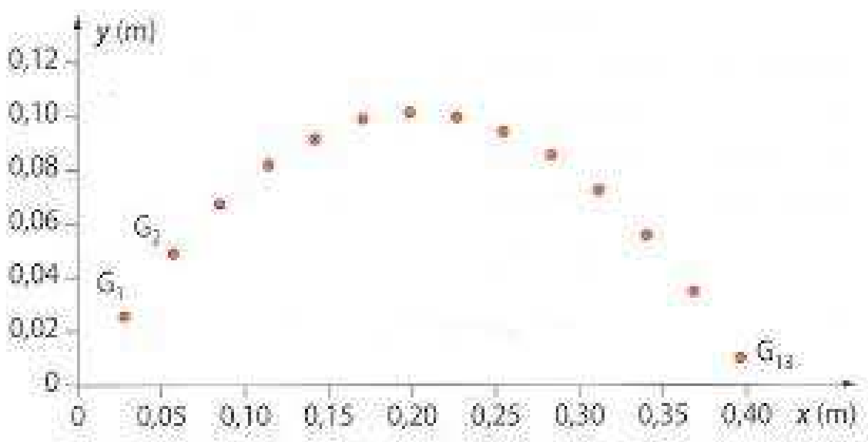
Equation de la trajectoire :

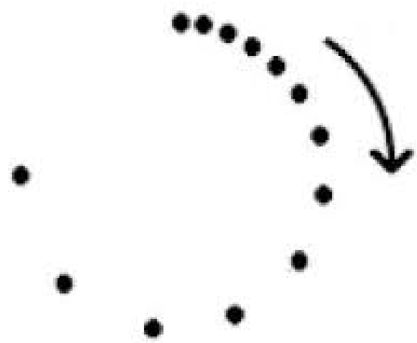
Discussion selon l’orientation de $\overrightarrow{v_0}$:

Ci-dessous des exemples d’enregistrement de mouvement à partir de chronophotographie. L’intervalle de temps entre deux points successifs est constant. Donner les types de mouvements, tracer des vecteurs vitesse et accélération.









D- Changement de référentiel, composition des mouvements

1-Problème, cadre

On étudie le mouvement d'un point M simultanément dans deux référentiels $\mathcal{R}_a$ et $\mathcal{R}_r$ en mouvement l'un par rapport à l'autre. L'un des référentiel est considéré comme absolu (ou fixe), l'autre est relatif (ou mobile). Ce choix est tout à fait arbitraire, on peut échanger les rôles.
Le temps est le même dans les deux référentiels.

- Dans $\mathcal{R}_a$,repère (O, $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$), M a les coordonnées (x,y,z) et la vitesse $\vec{v}_a$.
- Dans $\mathcal{R}_r$ repère (O', $\vec{i}', \vec{j}', \vec{k}'$), M a les coordonnées (x',y',z') et la vitesse $\vec{v}_r$.

On se limite à deux référentiels en ***translation rectiligne*** l'un par rapport à l'autre. *par ex. $\mathcal{R}_r$ est lié à un train sur une ligne droite dans $\mathcal{R}_a$ terrestre.*

On peut alors prendre la même base dans les deux référentiels : ($\vec{i}', \vec{j}', \vec{k}'$) = ($\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$), Le point O' est immobile *(par déf. du repère)* dans $\mathcal{R}_r$ mais en mouvement dans $\mathcal{R}_a$.

On appelle **vitesse d'entrainement** $\vec{v}_e$ la vitesse du point **O'** dans $\mathcal{R}_a$. Si $\mathcal{R}_r$ est en translation par rapport à $\mathcal{R}_a$, tous les points immobiles dans sont « entrainés à la même vitesse $\vec{v}_e$ dans $\mathcal{R}_a$ ils ont la même vitesse d'entrainement :

$\vec{v}_e = \vec{v}_a$ (O') vitesse absolue de O'

2- Composition des vitesses, transformation de Galilée

On a en décomposant : $\overrightarrow{OM} = \overrightarrow{OO'} + \overrightarrow{O'M}$

On dérive /t $d(\overrightarrow{OM})/dt = d(\overrightarrow{OO'})/dt + d(\overrightarrow{O'M})/dt$

Soit $\boxed{\vec{v}_a = \vec{v}_e + \vec{v}_r}$

Si la translation est rectiligne **ET** uniforme : $\vec{v}_e = \overrightarrow{\text{constante}}$

3- Composition des accélérations

Si on se limite toujours à la translation, tous les points ont la même accélération d'entrainement : $\vec{a}_e = d\vec{v}_e / dt$ (= accélération de O' dans $\mathbf{R_a}$.)

En dérivant /t la loi de composition des vitesses on obtient : $\vec{a}_a = \vec{a}_e + \vec{a}_r$
Attention, si les deux référentiels ne sont pas simplement en translation (et en particulier si l'un est en rotation par rapport à l'autre), il y a un terme de plus : l'accélération de Coriolis $\vec{a}_c$ ($\vec{a}_a = \vec{a}_e + \vec{a}_c + \vec{a}_r$) dont l'étude est hors programme.

$\boxed{\text{Si la translation est rectiligne uniforme : } \vec{a}_e = \vec{0} \text{ donc } \vec{a}_a = \vec{a}_r}$

L'accélération est donc invariante par changement de référentiels en translation rectiligne uniforme l'un par rapport à l'autre.

5- Exemples

- *On considère un passager qui se déplace dans un train en marchant à 4 km/h. Le train avance en ligne droite à 160 km/h.*

Quelle est la vitesse du passager par rapport aux arbres? Son accélération?

- *On considère un point en mouvement à une vitesse $\vec{v}$ dans le référentiel terrestre. Quelle est sa vitesse $\vec{v}_g$ dans le référentiel géocentrique?*

Ici , le référentiel absolu est le géocentrique, le relatif est le terrestre. La vitesse d'entraînement est la vitesse du sol dans le géocentrique, elle est orientée vers l'Est (sens inverse du mouvement apparent du Soleil dans le référentiel terrestre). Attention $\vec{v}_e$ n'est pas uniforme ici. Sa norme dépend de la latitude et de l'altitude. A voir selon le point.

On a : $\vec{v}_g = \vec{v}_e + \vec{v}$

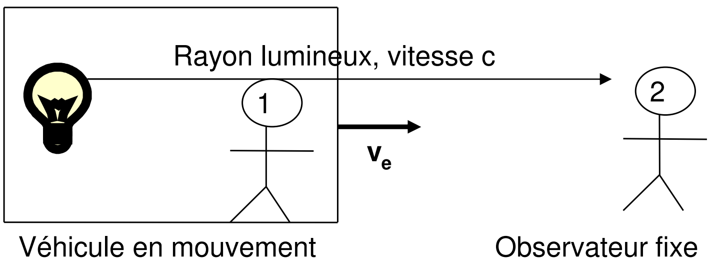
Dans ce cas, l'accélération n'est pas la même dans les deux référentiels, hors programme

6- Limites de la mécanique classique

La mesure de la vitesse **c** de la lumière dans des référentiels en mouvement a montré que cette vitesse ne dépend pas du référentiel *(mesures de c par Michelson, fin XIXème siècle)*. Sur le schéma ci-dessous, la source de lumière est simultanément fixe pour l'observateur ***1*** (référentiel $\mathcal{R}_r$.) mais en mouvement à la vitesse $\mathbf{v_e}$ pour l'observateur ***2*** (référentiel $\mathcal{R}_a$.).

D'après les lois précédentes, si ***1*** mesure C pour la vitesse de la lumière, ***2*** devrait mesurer ($\mathbf{v_e + c}$). Or, ***1*** et ***2*** mesurent la même vitesse **c** !! C'est donc une vitesse absolue.

Le temps ne peut donc plus être absolu…



En mécanique relativiste, le temps devient ainsi relatif et lié au référentiel. On parle d'espace-temps pour un observateur.

Si on déclenche deux horloges identiques au même instant initial et si l'une reste fixe alors que l'autre est embarquée dans un véhicule qui va faire un tour à grande vitesse, on constatera au retour que l'horloge qui a voyagé est en retard par rapport à celle qui est restée fixe. Le temps s'est écoulé plus vite pour l'horloge fixe. De même, on constate que le temps s'écoule plus vite à proximité d'un corps massif (planète, étoile) qu'à grande distance.

Les lois de la mécanique classique ne sont valables en pratique que si les vitesses sont très inférieures à la vitesse de la lumière (**v < c/100**)