Chapitre 2

Cinématique

Plan

A. Zellagui

I. Définition de la cinématique

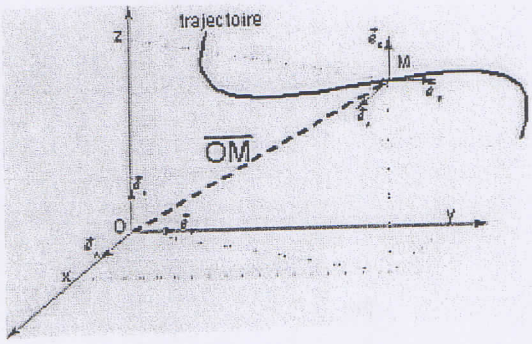
C'est l'étude de mouvement après avoir établi les équations d'accélération, de vitesse, et de position en fonction du temps. Ces dernières équations, appelés équations horaires, vont permettre à leur tour d'établir l'équation de la trajectoire.

II. Vecteur position

Un point M dans un repère R est caractérisé par son vecteur position : $\overrightarrow{OM}$, où O est le centre du repère

1. Vecteur $\vec{OM}$ en coordonnées cartésiennes

$$\boxed{\overrightarrow{OM} = x_{(t)}\vec{e_x} + y_{(t)}\vec{e_y} + z_{(t)}\vec{e_z}} = \begin{pmatrix} x(t) \\ y(t) \\ z(t) \end{pmatrix}_{\vec{e_x}, \vec{e_y}, \vec{e_z}}$$



- Equation horaire : c'est l'équation des coordonnées en fonction du temps.

$$x = f(t)$$

$$y = f(t)$$

$$z = f(t)$$

- Pour un mouvement rectiligne, on ne conserve qu'une seule coordonnée.
  Par exemple : x(t).

- La trajectoire est l'ensemble des positions occupées par le point M, c'est la relation liant les coordonnées x, y et z indépendamment du temps.
  On note : f(x, y, z) = 0

2. Vecteur $\vec{OM}$ en coordonnées cylindriques

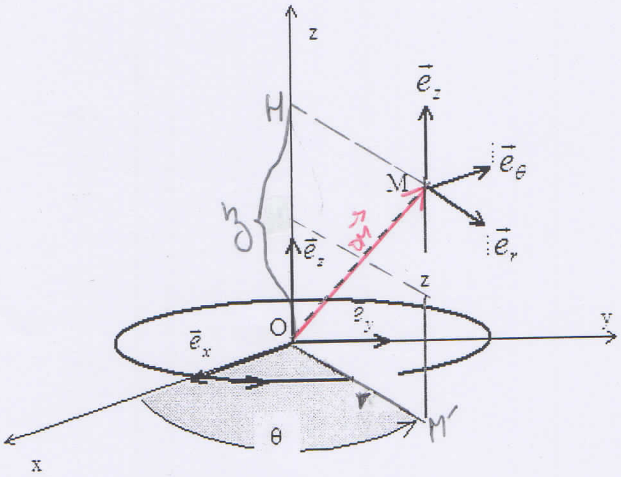
La base cylindrique est une base mobile

$$\vec{OM} = \vec{OH} + \vec{HM}$$

$$\boxed{\vec{OM} = z.\vec{e_z} + r.\vec{e_r}}$$

$$\vec{OM} = r.\vec{e_r} + 0.\vec{e_\theta} + z.\vec{e_z}$$

$$\vec{OM} = \begin{pmatrix} r \\ 0 \\ z \end{pmatrix}_{\vec{e_r}, \vec{e_\theta}, \vec{e_z}}$$



$OM' = HM = r$

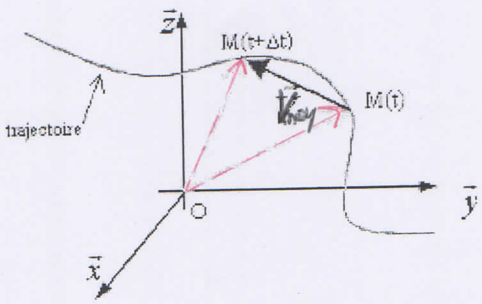
III. Vitesse d'un point

1. Vitesse moyenne

La vitesse moyenne d'un point M est obtenue en calculant le rapport de la distance parcourue par la durée du parcours.

Entre deux points $M(t+\Delta t)$ et $M(t)$ de la trajectoire le vecteur vitesse moyenne est :

$$\vec{V}_{moy.} = \frac{\vec{OM}_{(t+\Delta t)} - \vec{OM}_{(t)}}{\underbrace{\Delta t}_{t_f - t_i}}$$



2. Vitesse instantanée

En un point M de la trajectoire, la vitesse instantanée est la vitesse à un instant t donnée par :

$$\overrightarrow{v_{M/R}} = \frac{d\left(\overrightarrow{OM}\right)}{dt}$$

Vecteur tangent en tout point de la trajectoire

a) Vitesse instantanée en coordonnées cartésiennes

$$\vec{v} = \frac{d}{dt}\left(x\vec{e_x} + y\vec{e_y} + z\vec{e_z}\right) \qquad \vec{v} = \begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{pmatrix}_{\vec{e_x}, \vec{e_y}, \vec{e_z}}$$

$$= \frac{dx}{dt}\vec{e_x} + \frac{dy}{dt}\vec{e_y} + \frac{dz}{dt}\vec{e_z}$$

Car

b) Vitesse instantanée en coordonnes cylindriques

$$\vec{v} = \frac{d\,\overrightarrow{OM}}{dt} = \frac{d}{dt}\left(r.\vec{e_r} + z.\vec{e_z}\right)$$

$$\vec{v} = \frac{d}{dt}\left(r\vec{e_r}\right) + \frac{d}{dt}\left(z\vec{e_z}\right)$$

$$\vec{v} = \frac{dr}{dt}\vec{e_r} + r\underbrace{\frac{d\vec{e_r}}{dt}}_{\dot{\theta}\vec{e_\theta}} + \frac{dz}{dt}\vec{e_z} + z\underbrace{\frac{d\vec{e_z}}{dt}}_{\vec{0}}$$

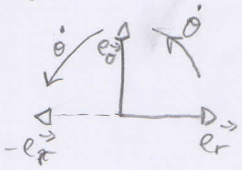
$$\vec{v} = \dot{r}\vec{e_r} + r\dot{\theta}\vec{e_\theta} + \dot{z}\vec{e_z}$$

$$\vec{v} = \begin{pmatrix} \dot{r} \\ r\dot{\theta} \\ \dot{z} \end{pmatrix}_{\vec{e_r}, \vec{e_\theta}, \vec{e_z}}$$

À RETENIR

$$\frac{d\vec{e_r}}{dt} = \dot{\theta}\vec{e_\theta}$$

$$\frac{d\vec{e_\theta}}{dt} = -\dot{\theta}\vec{e_r}$$



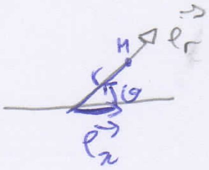
Remarque : * Pour un mouvement circulaire / $r = cst = R$ ($\dot{r} = 0$) pas de variation d'altitude ($\dot{z} = 0$, $z = 0$)

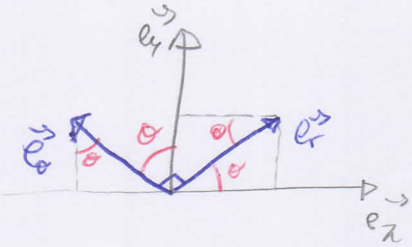
$$\Rightarrow \vec{v}\begin{pmatrix} 0 \\ R\dot{\theta} \\ 0 \end{pmatrix}_{\vec{e_r}, \vec{e_\theta}, \vec{e_z}} \quad \text{(vitesse tangentielle)}$$

* Pour un mouvement circulaire hélicoïdal : rotation + translation sur $\vec{Oz}$ /

$\Rightarrow \dot{r} = 0$ mais $\dot{z} \neq 0$

DM





$$\text{I}\begin{cases} \vec{e_r} = \cos\theta\, \vec{e_x} + \sin\theta\, \vec{e_y} \\ \vec{e_\theta} = -\cos\theta\, \vec{e_x} + \cos\theta\, \vec{e_y} \end{cases}$$

$f(\theta(t)) \qquad \frac{df}{dt} = \frac{df}{d\theta} \cdot \frac{d\theta}{dt}$ $= \dot{\theta} =$ vitesse angulaire (en rad/s)

$$\frac{d\cos(\theta(t))}{dt} = \frac{d\cos\theta}{d\theta} \cdot \frac{d\theta}{dt} = -\sin\theta\, \dot{\theta}$$

$$\text{I} \Rightarrow \begin{cases} \frac{d\vec{e_r}}{dt} = -\sin\theta \cdot \dot{\theta}\, \vec{e_x} + \cos\theta \cdot \dot{\theta}\, \vec{e_y} \\ \frac{d\vec{e_\theta}}{dt} = -\cos\theta \cdot \dot{\theta} \cdot \vec{e_x} - \sin\theta \cdot \dot{\theta} \cdot \vec{e_y} \end{cases}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} \frac{d\vec{e_r}}{dt} = \dot{\theta}\, (\underbrace{-\sin\theta\, \vec{e_x} + \cos\theta\, \vec{e_y}}_{\vec{e_\theta}}) \\ \frac{d\vec{e_\theta}}{dt} = -\dot{\theta}\, (\underbrace{\cos\theta\, \vec{e_x} + \sin\theta\, \vec{e_y}}_{\vec{e_r}}) \end{cases}$$

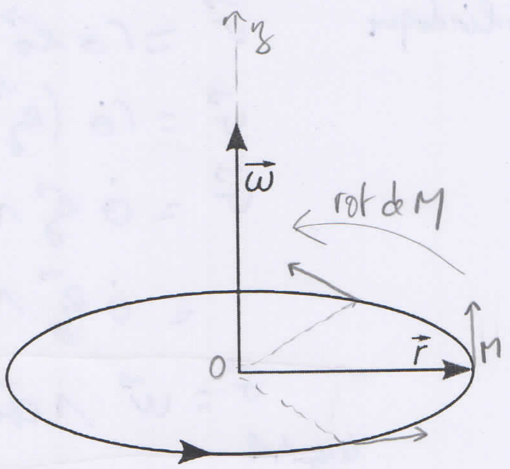
$$\Rightarrow \begin{cases} \frac{d\vec{e_r}}{dt} = \dot{\theta} \cdot \vec{e_\theta} \\ \frac{d\vec{e_\theta}}{dt} = -\dot{\theta}\, \vec{e_r} \end{cases}$$

c) Vitesse angulaire

Dans le cas **d'un mouvement de rotation** d'axe (Oz), on définit le vecteur :

$\vec{\omega} = \dot{\theta}\vec{e_z} = vitesse\ angulaire$

$\vec{v} = \vec{\omega} \wedge \vec{OM}$

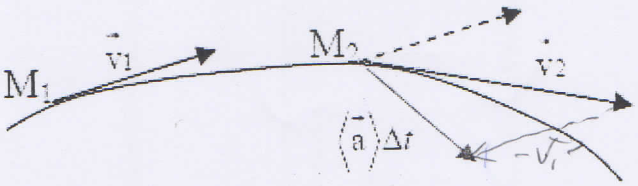


IV. Accélération d'un point

1. Accélération moyenne

Entre deux points M_1 et M_2 de la trajectoire, aux instants t_1 et t_2 , l'accélération moyenne est :

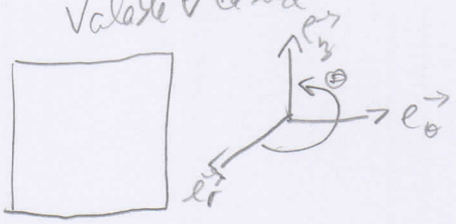
$$\vec{a}_{moy} = \langle\vec{a}\rangle_{\Delta t} = \frac{\vec{V_2} - \vec{V_1}}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta\vec{V}}{\Delta t}$$



a s'exprime en $m.s^{-2}$

$$\vec{V_2} - \vec{V_1} = \vec{V_2} + (-\vec{V_1})$$

Valable ∀ le sens



$$\boxed{\begin{aligned} \vec{e_r} \wedge \vec{e_\theta} &= \vec{e_z} \\ \vec{e_\theta} \wedge \vec{e_z} &= \vec{e_r} \\ \vec{e_z} \wedge \vec{e_r} &= \vec{e_\theta} \end{aligned}}$$

en Cylindrique

$$\vec{v} = r\dot{\theta}\,\vec{e_\theta}$$

$$\vec{v} = r\dot{\theta}\,(\vec{e_z} \wedge \vec{e_r})$$

$$\vec{v} = \dot{\theta}\,\vec{e_z} \wedge r\,\vec{e_r}$$

$$= \dot{\theta}\,\vec{e_z} \wedge \vec{r}$$

$$\boxed{\vec{v} = \vec{\omega} \wedge \vec{OM}}$$

tangentiel de rotation

vect vitesse angulaire.

2. Accélération instantanée

C'est la dérivé du vecteur vitesse par rapport au temps.

$$\boxed{\overrightarrow{a_{M/R}} = \left(\frac{d\vec{v}}{dt}\right)_R = \left(\frac{d^2\overrightarrow{OM}}{dt^2}\right)_R}$$

si on a la vitesse — si on a OM

$\Delta t \to dt$

$\Delta\vec{v} \to d\vec{v}$

$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{d}{dt}\left(\frac{d\overrightarrow{OM}}{dt}\right)$

a. En coordonnées cartésiennes

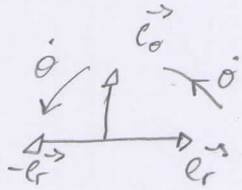
$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt}$ $\quad \vec{a} = \begin{pmatrix} \dot{v}_x \\ \dot{v}_y \\ \dot{v}_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{z} \end{pmatrix}_{\vec{e_x}, \vec{e_y}, \vec{e_z}}$

b. En coordonnées cylindriques

$$\overrightarrow{a_{M/R}} = \frac{d\vec{v}}{dt} \quad avec \quad \vec{v}\begin{pmatrix} \dot{r} \\ r\dot{\theta} \\ \dot{z} \end{pmatrix}_{\vec{e_r}, \vec{e_\theta}, \vec{e_z}}$$

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{d}{dt}\left(\dot{r}\vec{e_r} + r\dot{\theta}\vec{e_\theta} + \dot{z}\vec{e_z}\right)$$

Sachant que $\begin{cases} \frac{d\vec{e_r}}{dt} = \dot{\theta}\vec{e_\theta} \\ \frac{d\vec{e_\theta}}{dt} = -\dot{\theta}\vec{e_r} \end{cases}$



$\frac{d\vec{e_z}}{dt} = \vec{0}$

$$\vec{a} = \frac{d}{dt}\left(\dot{r}\vec{e_r}\right) + \frac{d}{dt}\left(r\dot{\theta}\vec{e_\theta}\right) + \frac{d}{dt}\left(\dot{z}\vec{e_z}\right)$$

$$\vec{a} = \frac{d\dot{r}}{dt}\vec{e_r} + \dot{r}\frac{d\vec{e_r}}{dt} + \frac{dr}{dt}\dot{\theta}\vec{e_\theta} + r\frac{d\dot{\theta}}{dt}\vec{e_\theta} + r\dot{\theta}\frac{d\vec{e_\theta}}{dt} + \frac{d\dot{z}}{dt}\vec{e_z}$$

$$\vec{a} = \ddot{r}\vec{e_r} + \dot{r}\dot{\theta}\vec{e_\theta} + \dot{r}\dot{\theta}\vec{e_\theta} + r\ddot{\theta}\vec{e_\theta} + r\dot{\theta}\left(-\dot{\theta}\vec{e_r}\right) + \ddot{z}\vec{e_z}$$

$$\vec{a} = \left(\ddot{r} - r\dot{\theta}^2\right)\vec{e_r} + \left(2\dot{r}\dot{\theta} + r\ddot{\theta}\right)\vec{e_\theta} + \ddot{z}\vec{e_z}$$

$\Rightarrow$

$$\vec{a}\begin{vmatrix} \overline{a_r} = \ddot{r} - r\dot{\theta}^2 \\ \overline{a_\theta} = 2\dot{r}\dot{\theta} + r\ddot{\theta} \\ \overline{a_z} = \ddot{z} \end{vmatrix}_{\vec{e_r}, \vec{e_\theta}, \vec{e_z}}$$

exemple : mouvement circulaire $\begin{cases} \text{accéléré} : \ddot{\theta} > 0 \\ \text{décéléré} : \ddot{\theta} < 0 \end{cases}$ ($\ddot{\theta}$ accélération angulaire en $rad \cdot s^{-2}$

$$\Rightarrow \begin{pmatrix} \ddot{z} = 0 & \dot{r} = 0 \\ \ddot{r} = 0 & r = R \end{pmatrix}$$

$$\Rightarrow \vec{a} \begin{pmatrix} -R\dot{\theta}^2 = a_r = a_n \\ R\ddot{\theta} = a_\theta = a_t \end{pmatrix}$$

accéléré $\Rightarrow \overline{a_t} > 0 \Rightarrow \vec{a_T}$ même sens que le mouvement

décéléré $\Rightarrow \overline{a_t} < 0 \Rightarrow \vec{a_T}$ de sens opposé au mouvement

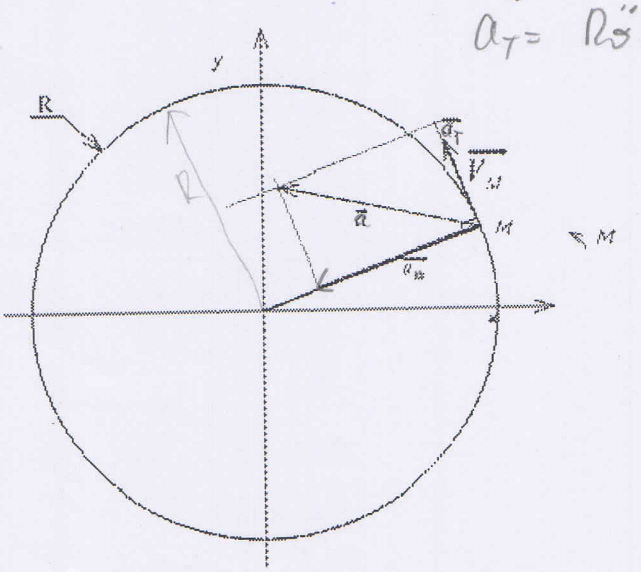
uniforme $\Rightarrow a_t = 0 \Rightarrow \vec{a} \begin{pmatrix} -R\dot{\theta}^2 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}_{\vec{e_r}, \vec{e_\theta}, \vec{e_z}}$

$$\vec{a} = \vec{a_n}$$

Exemple de représentation du vecteur accélération

d'un mouvement circulaire

$\vec{a_T} = R\ddot{\theta}\vec{e_\theta}$



$R\dot{\theta}\vec{e_\theta}$

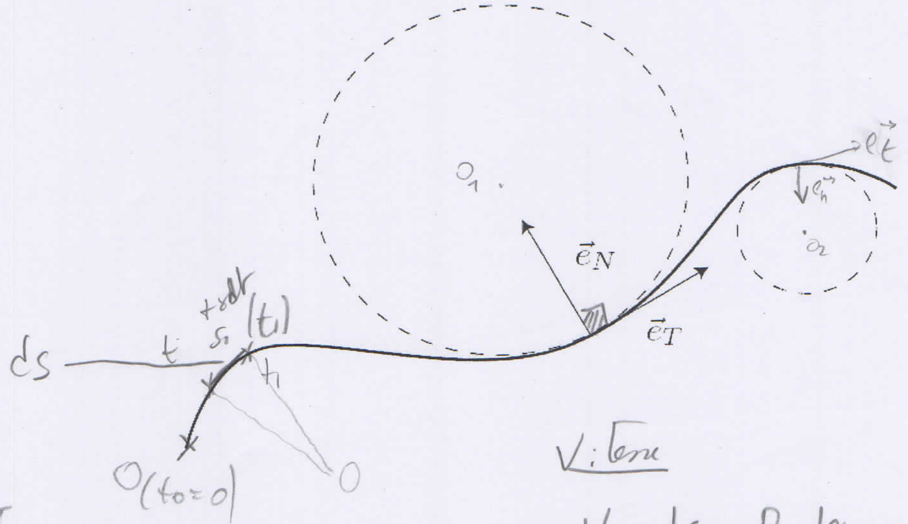
V. Coordonnées intrinsèques, composantes de Freinet

1. Vecteur vitesse

On peut aussi exprimer la vitesse et l'accélération à partir d'une base mobile $(M, \vec{e_t}, \vec{e_n}, \vec{e_b})$.

$\vec{e}_t$: vecteur unitaire tangent à la trajectoire.

$\vec{e}_n$: vecteur normale à la trajectoire orienté vers le centre de courbure de celle-ci.



Vitesse

$$V = \frac{ds}{dt} = R\frac{d\theta}{dt} = R\dot{\theta}\vec{e_t}$$

En base de Freinet le vecteur vitesse n'a qu'une seule composante

$\vec{V} = R\dot{\theta}\vec{e_t}$ ou bien $\vec{V}\begin{pmatrix} R\dot{\theta} \\ 0 \end{pmatrix}_{\vec{e_t},\vec{e_n}}$

→ vecteur puis norme

car $\vec{ds}$ est confondu avec la tangente à la trajectoire

2. Vecteur accélération

Par def $\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{d}{dt}(R\dot{\theta}\vec{e_t})$

$\vec{a} = R\frac{d}{dt}(\dot{\theta}\vec{e_t})$

$$\begin{cases} \vec{e_t} \equiv \vec{e_\theta} \Rightarrow \frac{d\vec{e_t}}{dt} = \frac{d\vec{e_\theta}}{dt} = -\dot{\theta}\vec{e_r} \\ \vec{e_n} \equiv -\vec{e_r} \end{cases}$$

d'où $\frac{d\vec{e_t}}{dt} = \dot{\theta}\vec{e_n}$

$$\vec{a} = R\frac{d(\dot{\theta})}{dt}\vec{e_t} + R\dot{\theta}\frac{d\vec{e_t}}{dt}$$
$$= R\ddot{\theta}\, e_t + R\dot{\theta}(\dot{\theta}\vec{e_n})$$
$$= \underbrace{R\ddot{\theta}}_{a_t}\vec{e_t} + \underbrace{R\dot{\theta}^2}_{a_n}\vec{e_n}$$

Conclusion.

Dans le repère de Freinet, l'accélération a deux composantes :

$$\boxed{\begin{array}{ll} a_t = \dfrac{dv}{dt} & \text{Accélération tangentielle} \\ a_n = \dfrac{v^2}{R} & \text{Accélération normale} \end{array}}$$

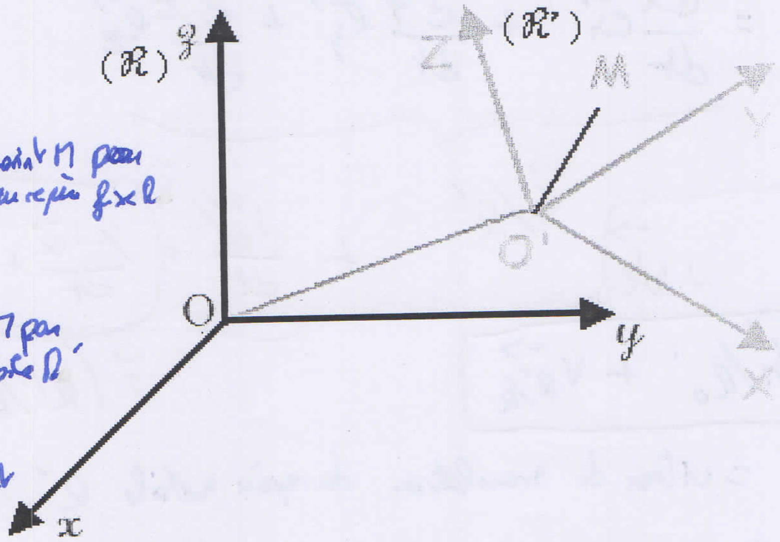
$$\Rightarrow \begin{cases} a_t = R\ddot{\theta} = \frac{d}{dt}(R\dot{\theta}) = \frac{dv}{dt} \\ a_n = R\dot{\theta}^2 = \frac{R^2\dot{\theta}^2}{R} = \frac{V^2}{R} \end{cases}$$

VI. Loi de composition de vitesse.

$\vec{V_a} = \vec{V_r} + \vec{V_e}$

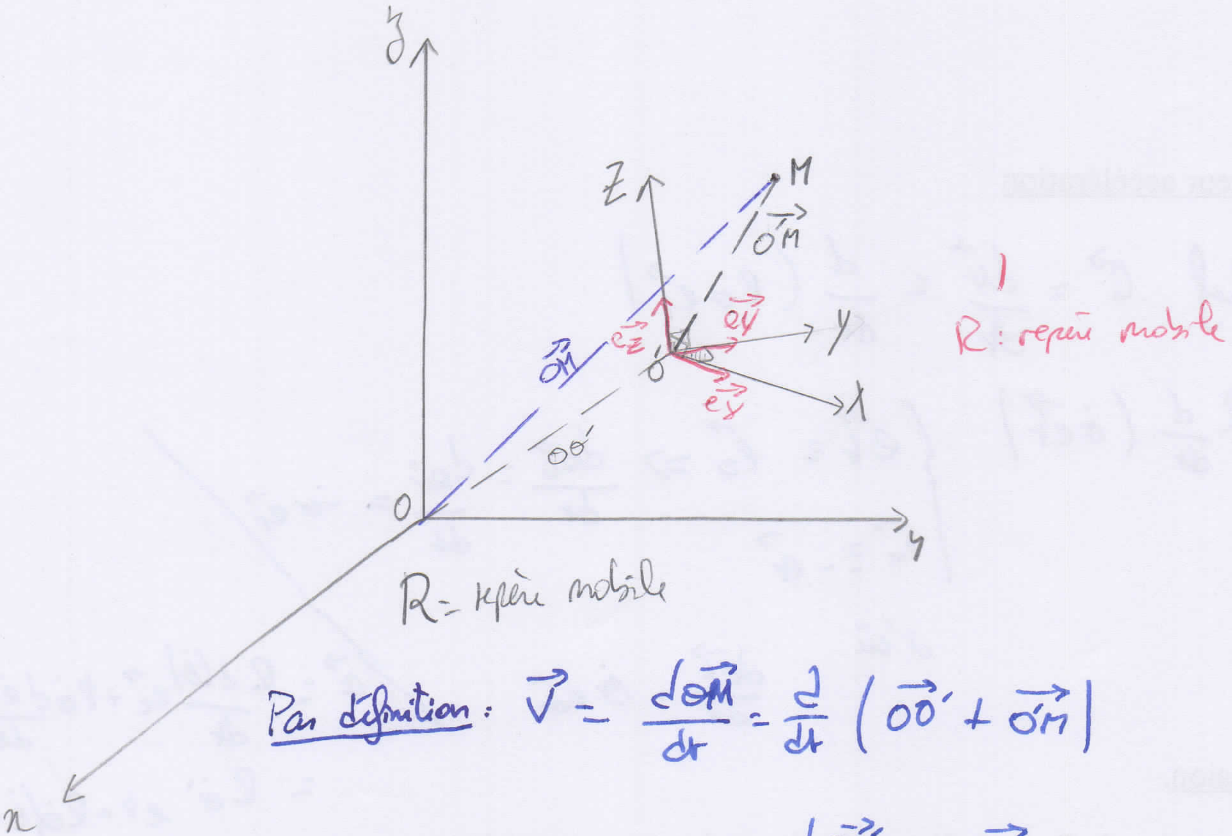
Vitesse absolue ⇒ vitesse du point M par rapport au repère fixe R

vitesse relative = vitesse du point M par rapport au repère mobile R'



Ve ⇒ Vitesse d'entraînement = vitesse du repère mobile R' par rapport au repère R

translation / rotation



$$\underline{\text{Par définition}} : \vec{V} = \frac{d\vec{OM}}{dt} = \frac{d}{dt}\left(\vec{OO'} + \vec{O'M}\right)$$

$$= \frac{d\vec{OO'}}{dt} + \frac{d\vec{O'M}}{dt}$$

$(uv)' = u'v + uv'$

$$= \frac{d\vec{OO'}}{dt} + \frac{d}{dt}\left(X\vec{e_X} + Y\vec{e_Y} + Z\vec{e_Z}\right)$$

par rapport à R

$$\vec{V}/R = \frac{d\vec{OO'}}{dt} + \frac{dX}{dt}\vec{e_X} + \frac{X d\vec{e_X}}{dt} + \frac{dY}{dt}\vec{e_Y} + \frac{Y d\vec{e_Y}}{dt} + \frac{dZ}{dt}\vec{e_Z} + \frac{Z d\vec{e_Z}}{dt}$$

$$= \underbrace{\frac{dX}{dt}\vec{e_X} + \frac{dY}{dt}\vec{e_Y} + \frac{dZ}{dt}\vec{e_Z}}_{\vec{V}/R'} + \frac{d\vec{OO'}}{dt} + \underbrace{\left(\frac{X d\vec{e_X}}{dt} + \frac{Y d\vec{e_Y}}{dt} + \frac{Z d\vec{e_Z}}{dt}\right)}_{\vec{V}(R'/R)}$$

vitesse de rotation de R'

$$\boxed{= \vec{V_a} = \vec{V_r} + \vec{V_e}}$$

$$\boxed{\vec{V_M}/R = \vec{V_M}/R_o' + \vec{V_{R'/R}}}$$

où $\begin{cases} \dfrac{d\vec{OO'}}{dt} = \text{vitesse de translation du repère mobile } R' \\ \vec{V_{rot}} = \vec{\Omega} \wedge \vec{O'M} \\ \text{de } R' \quad (\vec{\Omega} = \text{vitesse angulaire du repère } R') \end{cases}$

Exemples :

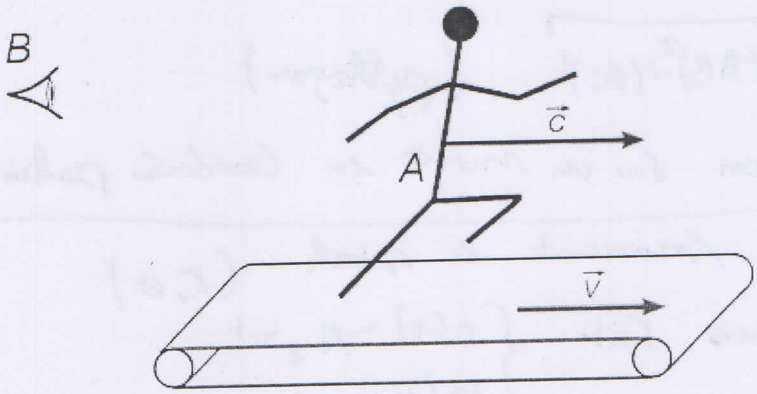
1) Imaginons qu'un homme *A* marche sur un tapis roulant. Pour un observateur immobile *B*, la vitesse de déplacement *V* de *A* correspond à la vitesse de *A* par rapport au tapis, notée *c*, **additionnée** à la vitesse *v* d'entrainement du tapis.

On obtient donc: $V = c + v$.

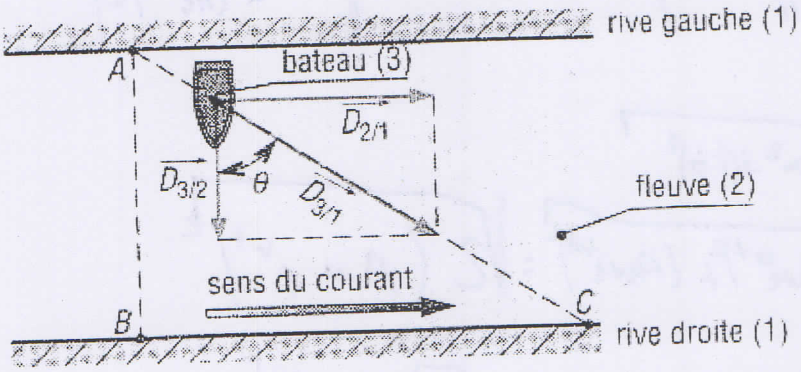
Si *A* va dans le sens contraire du tapis, alors *B* voit se déplacer *A* avec une vitesse

$$V = c - v.$$

C'est la loi de composition des vitesses ou loi d'additivité des vitesses.



2) Mouvement d'un bateau (3) qui traverse un fleuve (2), en partant du point A et en visant un point B de l'autre rive (1).



Loi de composition de vitesse pour l'exemple 2 :

On a $\vec{V}(M/R) = \vec{V}(M/R') + \vec{V}(R'/R)$

$\vec{V}_{Bateau/terre} = \vec{V}_{Bat/eau} + \vec{V}_{eau/terre}$

$\vec{V}_{3/1} = \vec{V}_{3/2} + \vec{V}_{2/1}$

ici, $\vec{V}_{2/1}$ correspond à la vitesse de translation

Le Bateau en partant de A (en visant B) arrive au point C à cause de $\vec{V}_{eau/terre}$

distance Réelle :

$$d = AC = \sqrt{(AB)^2 + (BC)^2} \quad \text{(pythagore)}$$

exemple d'application sur un mvmt en coordonnées polaires.

Coordonnées polaires / mouvement en spirale (r, θ)

Les équations horaires sont $\begin{cases} r(t) = A e^{wt} \\ \theta(t) = w.t \end{cases}$

Avec A et w ctes positives

$\vec{V}, \vec{a}, \|\vec{V}\|, \|\vec{a}\|$ / on a $\vec{V} = \begin{pmatrix} \dot{r} = Awe^{wt} \\ r\dot{\theta} = (Ae^{wt})w \end{pmatrix}$

$\begin{cases} r(t) = Ae^{wt} = Ae^{\theta} \\ \theta(t) = w.t \end{cases}$

$$\|\vec{V}\| = \sqrt{\dot{r}^2 + (r\dot{\theta})^2}$$

$$= \sqrt{(Awe^{wt})^2 + (Awe^{wt})^2} = \sqrt{2(Awe^{wt})^2}$$

$$= \sqrt{2}\, Awe^{wt}$$

on a $\vec{a} \begin{pmatrix} \ddot{r} - r\dot{\theta}^2 \\ r\ddot{\theta} + 2\dot{r}\dot{\theta} \end{pmatrix}_{\vec{e_r}, \vec{e_\theta}}$

$$\vec{a} = \begin{pmatrix} \overbrace{Aw^2e^{wt}}^{\ddot{r}} - \overbrace{Ae^{wt}.(w)^2}^{r\dot{\theta}^2} \\ Ae^{wt}(0) + 2Awe^{wt}(w) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 2Aw^2e^{wt} \end{pmatrix}_{\vec{e_r}, \vec{e_\theta}}$$

car $\dot{\theta} = cst = 0$ $\ddot{\theta} = 0$

$$\|\vec{a}\| = \sqrt{a_r^2 + a_\theta^2} = \sqrt{4A^2w^4e^{2wt}}$$

$$= 2Aw^2e^{wt}$$

VII. Type de mouvement

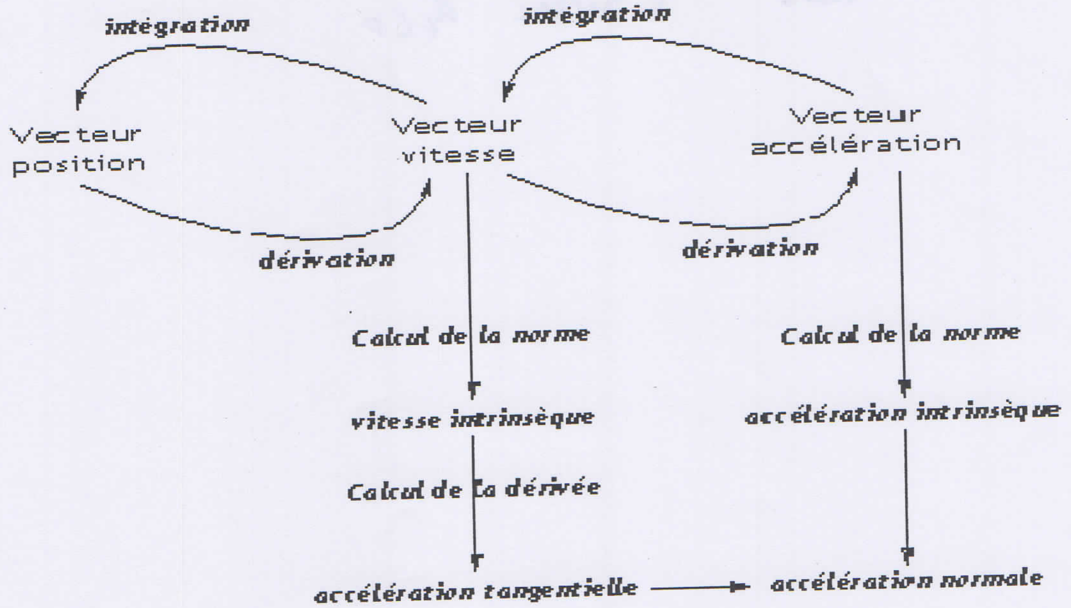
1. Trajectoire

- Rectiligne : La trajectoire est une droite dont le rayon de courbure est infini.

  $a_n = v^2 / R = 0, a = a_t = dv / dt$
- **Circulaire** : Trajectoire plane dont **le rayon de courbure** est **constant.**
- **Curviligne** : La trajectoire est une courbe quelconque.
- **Hélicoïdale** : La trajectoire est **une hélice**.

2. Nature du Mouvement

- Uniforme : La valeur algébrique de la vitesse est constante, seule la composante tangentielle de l'accélération est nulle.
- Uniformément varié : L'accélération tangentielle est constante
  - Accéléré : La vitesse augmente et $\overrightarrow{a_T}$ est dans le sens du mouvement
  - Décéléré : La vitesse diminue, et $\overrightarrow{a_T}$ est alors dans le sens opposé au sens du mouvement.
- Sinusoïdal : Une composante du vecteur position dépend sinusoïdalement de t
- Le mouvement du solide est :
  - De translation : Le vecteur vitesse est identique en tout point du solide.
  - De rotation : La trajectoire de chaque point du solide est circulaire



Remarque :

mvt curviligne :

$$\begin{cases} \vec{a_t} = \dfrac{dv}{dt} \\ a_n = \dfrac{v^2}{R} \end{cases}$$

mvt circulaire :

. unif ($v = cste$) $\begin{cases} a_t = 0 \\ a_n = \dfrac{v^2}{R} \end{cases}$ $\boxed{\vec{a} = \vec{a_n}}$

. accéléré ou décéléré (v varie) $\begin{cases} \vec{a_t} > 0 \text{ ou } < 0 \\ a_n = \dfrac{v^2}{R} \end{cases}$

$\boxed{\vec{a} = \vec{a_t} + \vec{a_n}}$ $\quad (\vec{v}, \vec{a}) = \alpha \neq \pi/2$

mvt rectiligne : $\equiv$ mvt curviligne avec $R \to \infty \Rightarrow a_n = \dfrac{v^2}{R} = 0$

. uniforme $\Rightarrow v = cste$ $\quad \vec{a} = \begin{cases} a_t = \dfrac{dv}{dt} = 0 \\ a_n = \dfrac{v^2}{R} = \dfrac{v^2}{\infty} = 0 \end{cases} = 0$

. uniformt varié $\begin{cases} \text{accéléré } a = a_t > 0 \\ \text{décéléré } a_t < 0 \end{cases}$ $\Rightarrow \vec{a} = \vec{a_t}$ (une seule composante)