Université Ibn Khaldoun de Tiaret
Faculté des Sciences Appliquées
Département des Sciences et de la Technologie A. U. : 2020/2021
L 1 : **Sciences & Techniques** **UEF : F112** (PHYS 1)

TD N°1 : Analyse dimensionnelle, Calcul vectoriel, Cinématique

1. Analyse dimensionnelle :

Exercice N°1:

1) Etablir les dimensions et les unités des grandeurs suivantes :
Vitesse, accélération, force, vitesse angulaire, accélération angulaire, travail, énergie cinétique, puissance, constante de pesanteur g, pression, quantité de mouvement.

Exercice N°2:

Vérifier l'homogénéité des formules suivantes :

$T = 2\pi\sqrt{\dfrac{m}{k}}$ c'est la période d'un oscillateur élastique, sachant que $F = kx$

$\tau = RC$ c'est la constante de temps du dipôle RC

$F = G\dfrac{m_1 m_2}{r^2}$ c'est la loi de la gravitation universelle, avec : G une constante exprimée en $\dfrac{m^3}{kg.s^2}$.

Exercice N°3:

La fréquence de vibration d'une goutte d'eau peut s'écrire sous la forme : $f = kR^{\alpha}\rho^{\beta}\tau^{\gamma}$
où k est une constante sans dimension. R est le rayon de la goutte, ρ sa masse volumique.
τ est la tension superficielle définie par une force par unité de longueur.
Déterminer par une analyse dimensionnelle les valeurs des paramètres α , β et γ .

(L'exercice 4 et 5 à faire à la maison)

Exercice N°4:

La période T d'un satellite terrestre circulaire peut dépendre, a priori, de m la masse de la Terre, du rayon R du cercle décrit et de la constante de la gravitation universelle G. On peut faire l'hypothèse que la période T a pour expression : $T = km^a R^b G^c$ ou k est une constante sans dimension.
- Déterminer, par une analyse dimensionnelle, les valeurs de a, b et c. En déduire l'expression de la formule de la période T.

Exercice N°5:

La valeur de la force de frottement fluide exercée par un fluide sur une sphère de rayon R se déplaçant à faible vitesse v par rapport au fluide est donnée par la relation de Stokes : $F = 6\pi\eta Rv$ où η est la viscosité du fluide.
- Etablir l'équation aux dimensions de la viscosité η .

2. Calcul vectoriel :

Exercice N°6: Soient les vecteurs suivants :

$\vec{u} = 2\vec{i} + \vec{j}$, $\vec{v} = 3\vec{j}$, $\vec{w} = -2\vec{i} + \vec{j}$, $\vec{a} = 3\vec{i} + 2\vec{j}$, $\vec{b} = -3\vec{i}$, $\vec{c} = \vec{i} - 3\vec{j}$

Calculer : $\vec{u} + \vec{v}$, $\vec{w} - \vec{a}$, $3\vec{c}$, $\vec{b} + 2\vec{v} + 3\vec{w}$, $2\vec{w} - \vec{a} + 3\vec{c} - \vec{b}$

Exercice N°7:
Soient les vecteurs suivants :

$\vec{V}_1 = 2\vec{i} - \vec{j} + 5\vec{k}$, $\vec{V}_2 = 3\vec{i} + 1.5\vec{j} - 7.5\vec{k}$, $\vec{V}_3 = -5\vec{i} + 4\vec{j} + \vec{k}$

* Calcul des expressions suivantes :

$\vec{V}_1.\vec{V}_2$, $\vec{V}_1.\vec{V}_1$, $\vec{V}_2.\vec{V}_2$, $\vec{V}_1 \Lambda \vec{V}_2$, $\vec{V}_2 \Lambda \vec{V}_3$, $\vec{V}_1 \Lambda \left(\vec{V}_2 \Lambda \vec{V}_3\right)$

* Calculer :

$\vec{i} \Lambda \vec{j}$, $\vec{j} \Lambda \vec{k}$, $\vec{k} \Lambda \vec{j}$, $\vec{j} \Lambda \vec{j}$, $\vec{j} \Lambda 4\vec{k}$, $2\vec{j} \Lambda 3\vec{k}$

3. Cinématique (Mouvement absolu) :

Exercice N°8:
Un point matériel M se déplace dans le plan (oxy) le long de la courbe dont les équations paramétriques en coordonnées cartésiennes s'écrivent :

$$\begin{cases} x(t) = 2t \\ y(t) = 4t^2 - 4t \end{cases}$$

où t représente le temps exprimé en secondes.
1) Déterminer l'équation de la trajectoire $y = f(x)$. La tracer dans le plan (oxy).
2) Déterminer à tout instant les composantes et les modules des vecteurs vitesse $\vec{v}(t)$ et accélération $\vec{\gamma}(t)$ dans le repère orthonormé (oxy). Le mouvement est-il uniforme ? Justifier.

Exercice N°9:
Un point M se déplace sur une spirale logarithmique d'équations polaires paramétriques :

$$\begin{cases} \rho(t) = \rho_0 e^{bt} \\ \theta(t) = bt \end{cases}$$

Ou ρ_0 et b sont des constantes positives.
1) Représenter la trajectoire du mobile M.
2) Déterminer dans la base des coordonnées polaires, les composantes radiales et orthoradiales de la vitesse et de l'accélération du point M. En déduire les normes de ces vecteurs.
3) Indiquer la nature du mouvement de M. (*uniforme, accéléré ou retardé* ?)
4) Préciser et représenter sur la figure la direction du vecteur accélération $\vec{\gamma}(t)$.
5) Déterminer en fonction de t les composantes tangentielle et normale de $\vec{\gamma}(t)$.
6) Déterminer le rayon de courbure de la trajectoire ρ_c.

Exercice N°10:
Soit l'hélice droite définie en coordonnées cylindriques par les équations :

$r = R$ et $z = h\theta$ (h constante)

et orientée dans le sens de θ croissant. L'origine est le point repéré par $z=0$.
1) Déterminer ses équations en coordonnées cartésiennes. Quels est le pas a de cette hélice.
2) Cette hélice est parcourue à la vitesse constante v par un point M
a) Déterminer le vecteur vitesse et le vecteur accélération.
b) Tracer l'hodographe.

1)

phys.1 Corrigé de la serie de TD N° 1

1) Analyse dimensionnelle :

Exercice 1

- Vitesse : $v = \frac{l}{t} \Rightarrow [v] = [\frac{l}{t}] = \frac{[l]}{[t]} = \frac{L}{T}$
  $= LT^{-1}$
- Accélération : $\gamma = \frac{v}{t} \Rightarrow [\gamma] = [\frac{v}{t}] = \frac{[v]}{[t]}$
  $= \frac{LT^{-1}}{T} = LT^{-2}$
- Force : $F = m\gamma \Rightarrow [F] = [m\gamma] = [m].[\gamma]$
  $= M.LT^{-2}$
- vitesse angulaire : $w = \frac{\theta}{t} \Rightarrow [w] = [\frac{\theta}{t}]$
  $= \frac{[\theta]}{[t]} = \frac{1}{T} = T^{-1}$

  Rappel : θ est ~~sans~~ sans dimension
- Accélération angulaire : $\alpha = \frac{w}{t} \Rightarrow [\alpha] = [\frac{w}{t}]$
  $= \frac{T^{-1}}{T} = T^{-2}$
- Travail : $W = F.l \Rightarrow [W] = [F.l] = [F].[l]$
  $= MLT^{-2}.L = ML^2T^{-2}$
- Energie cinétique : $E_c = \frac{1}{2}mv^2 \Rightarrow [E_c] = [\frac{1}{2}mv^2]$
  $= [\frac{1}{2}].[m].[v]^2 = 1 \times M.L^2T^{-2} = ML^2T^{-2}$
- pesanteur : $E_p = mgh \Rightarrow [E_p] = [mgh]$

2) $[E_p] = [m].[g].[h] \Rightarrow [g] = \dfrac{[E_p]}{[m].[h]}$

$= \dfrac{ML^2T^{-2}}{M.L} = LT^{-2}$, g a la dimension d'une accélération

- Pression : $p = \dfrac{F}{S} \Rightarrow [p] = [\dfrac{F}{S}] = \dfrac{[F]}{[S]}$

$= \dfrac{MLT^{-2}}{L^2} = ML^{-1}T^{-2}$

- quantité de Mvt : $p = mv \Rightarrow [p] = [m.v]$

$= [m].[v] = M.LT^{-1}$

Exercice 2

$T = 2\pi\sqrt{\dfrac{m}{k}}$

* $[T] = T$
* $[2\pi\sqrt{\dfrac{m}{k}}] = [2\pi].[m]^{\frac{1}{2}}.[k]^{-\frac{1}{2}} = M^{\frac{1}{2}}[k]^{-\frac{1}{2}}$

$[k] = ?$, on sait que $F = kx \Rightarrow k = \dfrac{F}{x}$

$[k] = [\dfrac{F}{x}] = \dfrac{[F]}{[x]} = \dfrac{MLT^{-2}}{L} = MT^{-2}$

donc $[2\pi\sqrt{\dfrac{m}{k}}] = M^{\frac{1}{2}}.(MT^{-2})^{-\frac{1}{2}} = M^{\frac{1}{2}}M^{-\frac{1}{2}}T$

$= T$

donc $[T] = [2\pi\sqrt{\dfrac{m}{k}}] = T$

l'expression $T = 2\pi\sqrt{\dfrac{m}{k}}$ est homogène

3)

EXERCICE 3

$f = K R^{\alpha} \rho^{\beta} \sigma^{\gamma}$, pour que l'expression puisse être correcte, il faut qu'elle soit homogène :

$[f] = T^{-1}$ car, c'est une fréquence.

$[K R^{\alpha} \rho^{\beta} \sigma^{\gamma}] = [K] \cdot [R]^{\alpha} \cdot [\rho]^{\beta} \cdot [\sigma]^{\gamma}$

$= L^{\alpha} \cdot (M L^{-3})^{\beta} \left(\frac{M L T^{-2}}{L}\right)^{\gamma}$

$= M^{\beta+\gamma} \cdot L^{\alpha-3\beta} \, T^{-2\gamma}$

donc, on peut écrire

$T^{-1} L^{0} . M^{0} = T^{-2\gamma} . L^{\alpha-3\beta} . M^{\beta+\gamma}$

par analogie, on trouve :

$$\begin{cases} \alpha - 3\beta = 0 \\ \beta + \gamma = 0 \\ -2\gamma = -1 \end{cases} \Rightarrow \begin{array}{l} \alpha = -\frac{3}{2} \\ \beta = -\frac{1}{2} \\ \gamma = \frac{1}{2} \end{array}$$

d'où $f = \frac{K}{R} \sqrt{\frac{\sigma}{R\rho}}$

4)

* $\tau = RC$

$[\tau] = T$, $[RC] = [R]\cdot[C] = ?$

on sait que $U = R \cdot i \Rightarrow R = \frac{U}{i} \Rightarrow [R] = \frac{[U]}{[i]}$

et que $C = \frac{i \cdot t}{U} \Rightarrow U = \frac{i\,t}{C}$

$\Rightarrow [U] = \frac{[i]\cdot[t]}{[C]}$

donc $[R.C] = \frac{\cancel{[U]}}{\cancel{[i]}} \cdot \frac{\cancel{[i]}\cdot[t]}{\cancel{[U]}} = [t] = T$

donc l'équation $\tau = RC$ est homogène

* $F = G \cdot \frac{m_1 m_2}{r^2}$, $[F] = MLT^{-2}$

$\left[G \frac{m_1 m_2}{r^2}\right] = \frac{[G]\cdot[m_1]\cdot[m_2]}{[r]^2} = [G]\cdot M^2 L^{-2}$

$[G] = ?$, $[G] = \frac{L^3}{M \cdot T^2}$

$\left[G \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}\right] = \frac{L^3}{MT^2} \cdot M^2 L^{-2} = M \cdot L\, T^{-2}$

donc, l'expression est homogène

2. Calcul vectoriel :

Exo6 :

$\vec{u}+\vec{v} = 2\vec{i}+4\vec{j}$

$\vec{w}-\vec{a} = (-2\vec{i}+\vec{j}) - (3\vec{i}+2\vec{j}) = -5\vec{i}-\vec{j}$

$3\vec{c} = 3(\vec{i}-3\vec{j}) = 3\vec{i}-9\vec{j}$

$\vec{b}+2\vec{v}+3\vec{w} = -3\vec{i}+6\vec{j}+(-6\vec{i}+3\vec{j})$

$= -9\vec{i}+9\vec{j}$

$2\vec{w}-\vec{a}+3\vec{c}-\vec{b} = -4\vec{i}+2\vec{j}-3\vec{i}-2\vec{j}+3\vec{i}-9\vec{j}$
$+3\vec{i}$

$= -3\vec{i}-9\vec{j}.$

Exo7 : $\vec{V_1} = \begin{pmatrix} 2 \\ -1 \\ 5 \end{pmatrix}$, $\vec{V_2} = \begin{pmatrix} 3 \\ 1{,}5 \\ -7{,}5 \end{pmatrix}$, $\vec{V_3} = \begin{pmatrix} -5 \\ 4 \\ 1 \end{pmatrix}$

$\vec{V_1}\cdot\vec{V_2} = 6 - 1{,}5 - 37{,}5 = -33.$

$\vec{V_1}\cdot\vec{V_1} = 4+1+25 = 30.$

$\vec{V_2}\cdot\vec{V_2} = \|\vec{V_2}\|\cdot\|\vec{V_2}\|\cdot \overset{=1}{\cancel{\cos(\theta)}}$, $\|\vec{V_2}\| = \sqrt{67{,}75}$

$= 67{,}75$

$$\vec{V_1}\wedge\vec{V_2} = \begin{vmatrix} \vec{i} & -\vec{j} & \vec{k} \\ 2 & -1 & 5 \\ 3 & 1{,}5 & -7{,}5 \end{vmatrix} = \overset{=0}{\cancel{(7{,}5-7{,}5)}}\,\vec{i} - \vec{j}\,(-15-15) + (3+3)\,\vec{k}$$

$\vec{V_1}\wedge\vec{V_2} = 30\vec{j}+6\vec{k}.$

5

$$\vec{V_2} \wedge \vec{V_3} = \begin{vmatrix} \vec{i} & -\vec{j} & \vec{k} \\ 3 & 1,5 & -7,5 \\ -5 & 4 & 1 \end{vmatrix}$$

$$= (1,5+30)\,\vec{i} + (3-37,5)(-\vec{j}) + (12+7,5)\,\vec{k}$$

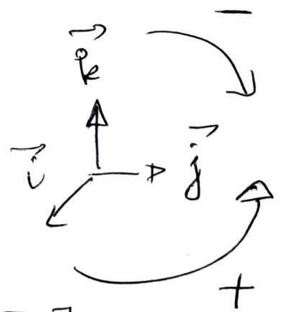
$$\vec{V_2} \wedge \vec{V_3} = 31,5\,\vec{i} + 34,5\,\vec{j} + 19,5\,\vec{k}$$

$$\vec{V_1} \wedge (\vec{V_2} \wedge \vec{V_3}) = \begin{vmatrix} \vec{i} & -\vec{j} & \vec{k} \\ 2 & -1 & 5 \\ 31,5 & 34,5 & 19,5 \end{vmatrix}$$

$$= (-19,5-172,5)\,\vec{i} + (39-157,5)(-\vec{j}) + (12+7,5)\,\vec{k}$$

$$\vec{V_1} \wedge (\vec{V_2} \wedge \vec{V_3}) = -192\,\vec{i} + 118,5\,\vec{j} + 19,5\,\vec{k}$$

$$\vec{i} \wedge \vec{j} = \begin{vmatrix} \vec{i} & -\vec{j} & \vec{k} \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{vmatrix} = \vec{k}$$



$\vec{j} \wedge \vec{k} = \vec{i}$, $\vec{k} \wedge \vec{j} = -\vec{i}$

$$\vec{j} \wedge \vec{j} = \begin{vmatrix} \vec{i} & -\vec{j} & \vec{k} \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{vmatrix} = \vec{0}$$

$\vec{i} \wedge \vec{i} = \vec{0}$

$\vec{k} \wedge \vec{k} = \vec{0}$

$\vec{i} \cdot \vec{i} = 1$

$\vec{j} \cdot \vec{j} = 1$

$\vec{k} \cdot \vec{k} = 1$

$\vec{j} \wedge 4\vec{k} = 4\vec{i}$

$2\vec{j} \wedge 3\vec{k} = 6\vec{i}$

3. Cinématique :

6

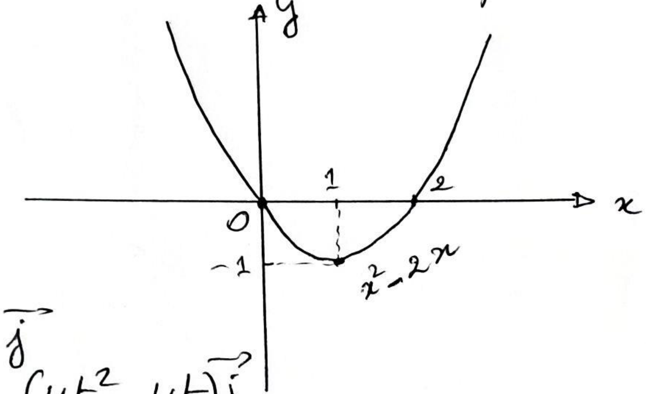
EXO8 : $\begin{cases} x = 2t & \longrightarrow (1) \\ y = 4t^2 - 4t & \longrightarrow (2) \end{cases}$

1. Equation de la trajectoire :

D'après (1) $\Rightarrow t = \frac{x}{2}$, on remplace dans (2)

$$y = 4\left(\frac{x}{2}\right)^2 - 4\left(\frac{x}{2}\right) = \cancel{4}\cdot\frac{x^2}{\cancel{4}} - 2x$$

$$\Rightarrow \boxed{y = x^2 - 2x} \longrightarrow \text{Equation d'une parabole.}$$



$\vec{OM} = x\vec{i} + y\vec{j}$

$\vec{OM} = (2t)\vec{i} + (4t^2 - 4t)\vec{j}$

_ Vecteur vitesse :

$$\vec{v} = \frac{d\vec{OM}}{dt} = 2\vec{i} + (8t-4)\vec{j}$$

La norme de la vitesse :

$$\|\vec{v}\| = \sqrt{2^2 + (8t-4)^2} = \sqrt{4 + 64t^2 - 64t + 16}$$

$$\|\vec{v}\| = 2\sqrt{1 + 16t^2 - 16t + 4}$$

- Vecteur accélération $\vec{\gamma}$:

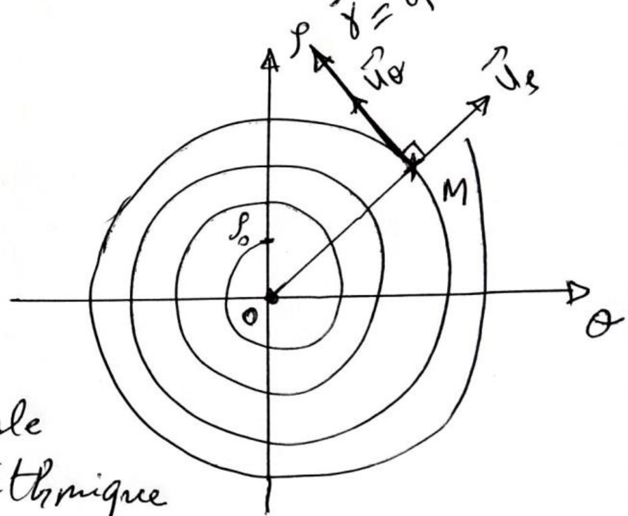
$$\vec{\gamma} = \frac{d\vec{v}}{dt} = 8\vec{j}$$

Module de $\vec{\gamma}$:

$$\|\vec{\gamma}\| = 8 \ m/s^2$$

(7)

Le mouvement de M n'est pas uniforme car $\|\vec{\gamma}\|$ est constante et $\|\vec{v}\|$ est variable. Donc il s'agit d'un mouvement uniformément varié.



EX09 :
$$\begin{cases} \rho = \rho_0 e^{bt} \\ \theta = bt \end{cases}$$

$t = \theta / b$

donc : $\rho = \rho_0 e^{b \cdot \frac{\theta}{b}}$

$\Rightarrow \boxed{\rho = \rho_0 e^{\theta}} \rightarrow$ spirale logarithmique

- Vecteur position :

$$\vec{OM} = \rho \cdot \vec{u_\rho} = (\rho_0 e^{bt}) \cdot \vec{u_\rho}.$$

- Vecteur vitesse :

$$\vec{v} = \frac{d\vec{OM}}{dt} = \underbrace{(\rho_0 b e^{bt})}_{\text{composante radiale de } \vec{v}} \vec{u_\rho} + \underbrace{(\rho_0 e^{bt} \cdot b)}_{\text{composante orthoradiale de } \vec{v}} \vec{u_\theta}$$

- Vecteur accélération $\vec{\gamma}$:

$$\vec{\gamma} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \cancel{(\rho_0 b^2 e^{bt})} \vec{u_\rho} + (\rho_0 b \cdot e^{bt} \cdot b) \vec{u_\theta} + (\rho_0 b^2 e^{bt}) \vec{u_\theta}$$

$\cancel{(-\rho_0 b^2 e^{bt})\vec{U_\rho}}$

$$\Rightarrow \vec{\gamma} = \underbrace{(2\rho_0 b^2 e^{bt})}_{\text{composante orthoradiale de } \vec{\gamma}} \vec{U_\theta}$$

La composante radiale de $\vec{\gamma}$ est nulle.

8

2. Le module de $\vec{v}$ et $\vec{\gamma}$:

$$\|\vec{v}\| = \sqrt{(\rho_0 b e^{bt})^2 + (\rho_0 b e^{bt})^2}$$

$$= \sqrt{\rho_0^2 b^2 e^{2bt} + \rho_0^2 b^2 e^{2bt}} = \sqrt{2\rho_0^2 b^2 e^{2bt}}$$

$$\boxed{\|\vec{v}\| = \sqrt{2} \cdot \rho_0 b e^{bt}}$$

$$\|\vec{\gamma}\| = \sqrt{(2\rho_0 b^2 e^{bt})^2} = \sqrt{4\rho_0^2 b^4 e^{2bt}}$$

$$\boxed{\|\vec{\gamma}\| = 2\rho_0 b^2 e^{bt}}$$

3. La nature du mouvement de M :
puisque v est variable et la fonction présente est une fonction croissante (Mathématiquement), donc le mouvement de M est un mouvement uniformément varié accéléré.

4. La direction de $\vec{\gamma}$: (voir la figure)

5. Base de Frenet (base intrinsèques)

$$\vec{v} = \|\vec{v}\| \cdot \vec{U_T}$$

$$\vec{\gamma} = \gamma_T \cdot \vec{u_T} + \gamma_N \cdot \vec{u_N}$$

avec: $\gamma_T = \frac{dv}{dt}$ et $\gamma_N = \frac{v^2}{\rho_c}$

$$\gamma_T = \frac{d}{dt}\left(\sqrt{2}\cdot \rho_0 b e^{bt}\right) \Rightarrow \boxed{\gamma_T = \sqrt{2}\,\rho_0 b^2 e^{bt}}$$

$$\gamma^2 = \gamma_T^2 + \gamma_N^2 \Rightarrow \gamma_N = \sqrt{\gamma^2 - \gamma_T^2}$$

$$\Rightarrow \gamma_N = \sqrt{\left(2\rho_0 b^2 e^{bt}\right)^2 - \left(\sqrt{2}\,\rho_0 b^2 e^{bt}\right)^2}$$

$$\Rightarrow \gamma_N = \sqrt{4\rho_0^2 b^4 e^{2bt} - 2\rho_0^2 b^4 e^{2bt}}$$

$$= \sqrt{2\rho_0^2 b^4 e^{2bt}}$$

$$\boxed{\gamma_N = \sqrt{2}\,\rho_0 b^2 e^{bt}}$$

6. Le rayon de courbure ρ_c:

$$\gamma_N = \frac{v^2}{\rho_c} \Rightarrow \rho_c = \frac{v^2}{\gamma_N} = \frac{\left(\sqrt{2}\,\rho_0 b e^{bt}\right)^2}{\sqrt{2}\,\rho_0 b^2 e^{bt}}$$

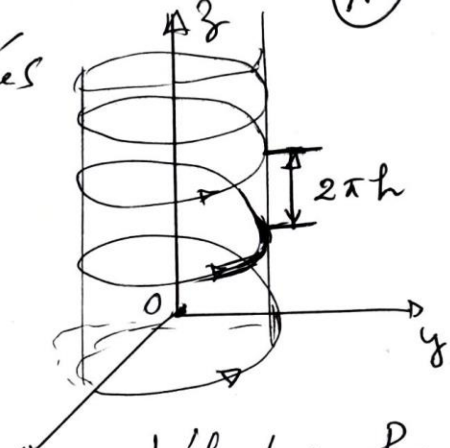
$$\Rightarrow \rho_c = \frac{2\cancel{\rho_0^2}\,\cancel{b^2}\,e^{2\cancel{bt}}}{\sqrt{2}\,\cancel{\rho_0}\,\cancel{b^2}\,\cancel{e^{bt}}} = \frac{2}{\sqrt{2}}\cdot\rho_0 e^{bt}$$

$$\Rightarrow \boxed{\rho_c = \sqrt{2}\,\rho_0 e^{bt}}$$

Exo 10 : Mouvement hélicoïdal

10

$$\begin{cases} \rho = R \\ z = h\theta \end{cases}$$



1. Les équations en coordonnées cartésiennes :

$$\begin{cases} x = \rho\cos\theta \\ y = \rho\sin\theta \\ z = h\theta \end{cases}$$

Le pas de l'hélice est $a = 2\pi h$.

3. L'hodographe.

2. Le vecteur vitesse et accélération :

$$\vec{OM} = \rho\vec{u_\rho} + z\vec{k} = R\vec{u_\rho} + h\theta\,\vec{k}.$$

Vecteur vitesse :

$$\vec{v} = \frac{d\vec{OM}}{dt} = R.\dot{\theta}\,\vec{u_\theta} + h\dot{\theta}\,\vec{k}$$

Vecteur accélération :

$$\vec{\gamma} = \frac{d\vec{v}}{dt} = -R\dot{\theta}^2\vec{u_\rho} + R\ddot{\theta}\vec{u_\theta} + h\ddot{\theta}\,\vec{k}$$

Les modules de $\vec{v}$ et $\vec{\gamma}$:

$$\|\vec{v}\| = \sqrt{(R\dot{\theta})^2 + (h\dot{\theta})^2} = \dot{\theta}\sqrt{R^2 + h^2}$$

$$\|\vec{\gamma}\| = \sqrt{(-R\dot{\theta}^2)^2 + (R\ddot{\theta})^2 + (h\ddot{\theta})^2}$$

$$\|\vec{\gamma}\| = \sqrt{R^2\dot{\theta}^4 + R^2\ddot{\theta}^2 + h^2\ddot{\theta}^2}$$

Le point M est parcourir l'hélice à une vitesse constante $v = C^{te}$

(11)

$$v = \dot{\theta}\sqrt{R^2 + h^2} = C^{te}$$

$$\Rightarrow \dot{\theta} = \frac{C^{te}}{\sqrt{R^2 + h^2}}$$ $\Rightarrow$ puisque $\dot{\theta}$ = constante

$\Rightarrow \ddot{\theta} = 0.$

Donc :

$$\vec{\gamma} = -R\dot{\theta}^2 \vec{u_\rho} = -R\left(\frac{C^{te}}{\sqrt{R^2 + h^2}}\right)^2 \cdot \vec{u_\rho}$$

par conséquent :

$$\|\vec{\gamma}\| = +R\dot{\theta}^2 = R \cdot \left(\frac{C^{te}}{\sqrt{R^2 + h^2}}\right)^2.$$