

Mouvements courbes

Sommaire

I Mouvement courbe dans le plan	2
I/A Repère et repérage en coordonnées polaires	2
I/B Exemples de mouvements plans	4
I/C Application : pendule simple	5
II Mouvement courbe dans l'espace	7
II/A Coordonnées cylindriques	7
II/B Coordonnées sphériques	8

✖ Capacités exigibles

- Identifier les degrés de liberté d'un mouvement. Choisir un système de coordonnées adapté au problème.
- Vitesse et accélération dans le repère de Frenet pour une trajectoire plane.
- Coordonnées cylindriques : exprimer à partir d'un schéma le déplacement élémentaire, construire le trièdre local associé et en déduire géométriquement les composantes du vecteur vitesse.
- Établir les expressions des composantes des vecteurs position, déplacement élémentaire, vitesse et accélération en coordonnées cylindriques.
- Mouvement circulaire uniforme et non uniforme : exprimer les composantes du vecteur position, du vecteur vitesse et du vecteur accélération en coordonnées polaires planes.
- Exploiter les liens entre les composantes du vecteur accélération, la courbure de la trajectoire, la norme du vecteur vitesse et sa variation temporelle.
- Établir l'équation du mouvement du pendule simple. Justifier l'analogie avec l'oscillateur harmonique dans le cadre de l'approximation linéaire.

✓ L'essentiel

▣ Définitions

<input type="checkbox"/> M3.1 : Coordonnées polaires	2
<input type="checkbox"/> M3.2 : Mouvement circulaire	4
<input type="checkbox"/> M3.3 : Mouvement circulaire uniforme	4
<input type="checkbox"/> M3.4 : Repère de FRENET	4
<input type="checkbox"/> M3.5 : Tension d'un fil	5
<input type="checkbox"/> M3.6 : Coordonnées cylindriques	7
<input type="checkbox"/> M3.7 : Repère sphérique	8

❖ Propriétés

<input type="checkbox"/> M3.1 : Lien polaires/cartésiennes	2
<input type="checkbox"/> M3.2 : Dérivées de \vec{u}_r et \vec{u}_θ	2
<input type="checkbox"/> M3.3 : Déplacement élémentaire polaire	3
<input type="checkbox"/> M3.4 : Vitesse en polaires	3
<input type="checkbox"/> M3.5 : Accélération en polaires	4
<input type="checkbox"/> M3.6 : Vitesse et accélération FRENET	5
<input type="checkbox"/> M3.7 : Mouvement d'un pendule simple	6

☰ Démonstrations

<input type="checkbox"/> M3.1 : Lien polaires/cartésiennes	2
<input type="checkbox"/> M3.2 : Dérivées de \vec{u}_r et \vec{u}_θ	3
<input type="checkbox"/> M3.3 : Déplacement élémentaire polaire	3
<input type="checkbox"/> M3.4 : Vitesse en polaires	3
<input type="checkbox"/> M3.5 : Accélération en polaires	4
<input type="checkbox"/> M3.6 : Vitesse et accélération FRENET	5
<input type="checkbox"/> M3.7 : Mouvement pendule simple	6

» Implications

<input type="checkbox"/> M3.1 : Mouvement circulaire	4
<input type="checkbox"/> M3.2 : Mouvement circulaire uniforme	4
<input type="checkbox"/> M3.3 : Condition de tension	5
<input type="checkbox"/> M3.4 : Volume élémentaire cylindriques	7
<input type="checkbox"/> M3.5 : Déplacement et volume élémentaire sphérique	8

❖ Remarques

<input type="checkbox"/> M3.1 : Cas limites repère de FRENET	5
<input type="checkbox"/> M3.2 : Pendule simple grands angles	6

☒ Exemples

<input type="checkbox"/> M3.1 : Mouvement circulaire uniforme	4
<input type="checkbox"/> M3.2 : Repérage sphérique sur Terre	8

🔧 Outils

<input type="checkbox"/> M3.1 : Dérivée composée en physique	2
--	---

♥ Points importants

<input type="checkbox"/> M3.1 : Bilan : coordonnées cylindriques	7
--	---

⚠ Erreurs communes

<input type="checkbox"/> M3.1 : Variables vs. coordonnées	2
<input type="checkbox"/> M3.2 : Choix des coordonnées	8

I Mouvement courbe dans le plan

I/A Repère et repérage en coordonnées polaires

I/A) 1 Position

♥ Définition M3.1 : Coordonnées polaires

Le repère polaire est constitué d'une origine O autour de laquelle sont définis deux vecteurs \vec{u}_r et \vec{u}_θ tels que :

- ◊
- ◊
- ◊

\vec{u}_r et \vec{u}_θ dépendent de $\theta(t)$ donc du temps

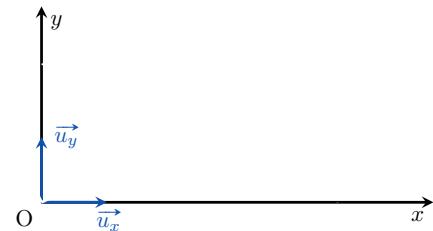


FIGURE M3.1 – Polaires

Attention M3.1 : Variables vs. coordonnées

Il faut opérer la distinction entre les **variables** servant à repérer le point et les **coordonnées** dans la base de projection. Ici, les variables sont $r(t)$ et $\theta(t)$, mais dans la base $(\vec{u}_r, \vec{u}_\theta)$, on a

$$\overrightarrow{OM}(t) = \begin{pmatrix} r(t) \\ 0 \end{pmatrix} = r(t)\vec{u}_r \quad \text{ET PAS} \quad \overrightarrow{OM}(t) = \begin{pmatrix} r(t) \\ \theta(t) \end{pmatrix} = r(t)\vec{u}_r + \theta(t)\vec{u}_\theta$$

pas homogène !

♥ Propriété M3.1 : Lien polaires/cartésiennes

Les vecteurs \vec{u}_r et \vec{u}_θ variables se décomposent sur \vec{u}_x et \vec{u}_y fixes tels que

et

d'où en cartésiennes pour un point M :

et

soit

Démonstration M3.1 : Lien polaires/cartésiennes

On projette les vecteurs de la base polaire sur la base cartésienne en appliquer la méthode de vraisemblance ou par définition du produit scalaire, d'où la propriété. On a alors :

I/A) 2 Déplacement élémentaire

♥ Outils M3.1 : Dérivée composée en physique

En physique, on pense les dérivées comme des fractions. Ainsi, on peut traiter la dérivée d'une composition en faisant intervenir d'autres dérivées par une écriture fractionnaire. Par exemple :

♥ Propriété M3.2 : Dérivées de \vec{u}_r et \vec{u}_θ

La variation temporelle des vecteurs de la base polaire est :

et

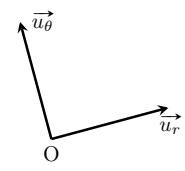
Démonstration M3.2 : Dérivées de \vec{u}_r et \vec{u}_θ **Géométriquement**

On représente les deux vecteurs après un petit temps dt , augmentés d'un angle $d\theta$:

et

Soit

et

**FIGURE M3.2****Mathématiquement**

On part des décompositions dans la base cartésienne et on dérive :

\vec{u}_r

\vec{u}_θ

■

■

♥ Propriété M3.3 : Déplacement élémentaire polaire

Le déplacement élémentaire en polaires :

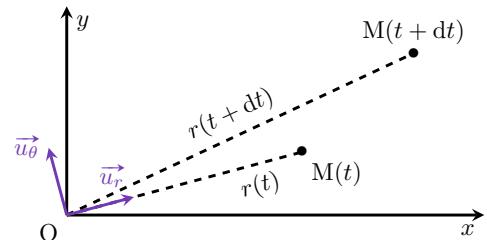
Démonstration M3.3 : Déplacement élémentaire polaire

On trouve la composante de $d\vec{OM}$ sur \vec{u}_r en fixant θ et on incrémenté la variable r de dr .

La distance ainsi obtenue est _____

On trouve la composante de $d\vec{OM}$ sur \vec{u}_θ en fixant r et on incrémenté la variable θ de $d\theta$.

La distance ainsi obtenue est _____

**FIGURE M3.3 – $d\vec{OM}$ polaire****I/A) 3 Vitesse en coordonnées polaires****♥ Propriété M3.4 : Vitesse en polaires**

La vitesse en polaires :

Démonstration M3.4 : Vitesse en polaires

Comme en coordonnées cartésiennes, il y a deux manières d'obtenir l'expression de la vitesse.

Dérivée

Rapport

I/A) 4 Accélération

♥ Démonstration M3.5 : Accélération en polaires



♥ Propriété M3.5 : Accélération en polaires



Accélération en polaires :

I/B Exemples de mouvements plans

I/B) 1 Mouvement circulaire

Définition M3.2 : Mouvement circulaire



Un mouvement est dit **circulaire** s'il se fait dans un plan, à une distance de l'axe de rotation r constante, soit



Implication M3.1 : Mouvement circulaire

Dans ce cas-là, on a et

En notant $\omega(t) = \dot{\theta}(t)$ la vitesse angulaire, la vitesse et l'accélération donnent

et

I/B) 2 Mouvement circulaire uniforme

♥ Définition M3.3 : Mouvement circulaire uniforme



Exemple M3.1 :



Un mouvement est dit **circulaire uniforme** si c'est un mouvement circulaire $(r(t) = \text{cte})$ à *vitesse angulaire constante*, soit

et

Implication M3.2 : Mouvement circulaire uniforme



Dans ce cas, $\dot{r}(t) = 0 = \ddot{r}(t)$ mais également $\ddot{\theta}(t) = 0$, donc la vitesse et l'accélération donnent

et

FIGURE M3.4

I/B) 3 Courbe quelconque : repère de FRENET

♥ Définition M3.4 : Repère de FRENET



Soit un point M sur une trajectoire courbe d'origine O . On approche sa trajectoire à un instant t par son **cercle osculateur**, de **rayon de courbure** $R(t)$. D'où le repère mobile de FRENET attaché à $M(t)$:

◊

◊

$\gamma(t) = 1/R(t)$ s'appelle la **courbure** de la trajectoire.

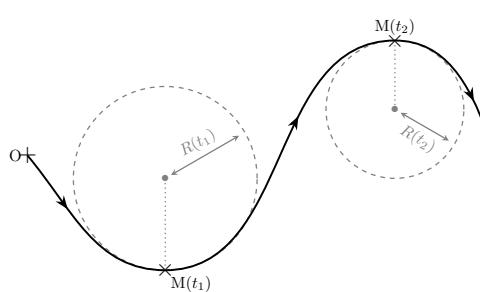


FIGURE M3.5 – FRENET

♥ Propriété M3.6 : Vitesse et accélération FRENET

La vitesse et l'accélération dans le repère mobile de FRENET s'expriment :

et

Démonstration M3.6 : Vitesse et accélération FRENET

Vitesse

Soit $s(t)$ l'**abscisse curviligne**, c'est-à-dire la distance parcourue sur la trajectoire C depuis l'origine O, telle que $s(t) = \int_C ds$. Par construction, $d\overrightarrow{OM}$ est composé du scalaire « petite distance » dans la direction du mouvement, c'est-à-dire $\overrightarrow{u_T}$; on a donc

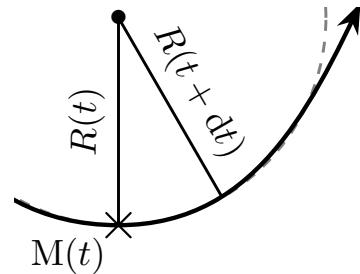


FIGURE M3.6 – $d\overrightarrow{u_T}$

Accélération

On a

Or,

D'où

Remarque M3.1 : Cas limites repère de FRENET

- ◊ On retrouve le mouvement rectiligne uniforme avec $R = +\infty \Leftrightarrow \gamma = 0$, puisqu'on a alors $\vec{a} = \frac{dv}{dt} \overrightarrow{u_T}$ avec $\overrightarrow{u_T}$ dans le sens de la trajectoire.
- ◊ On retrouve également le mouvement circulaire puisque dans ce cas la trajectoire **est** le cercle osculateur, donc $\overrightarrow{u_T} = \overrightarrow{u_\theta}$ et $\overrightarrow{u_N} = -\overrightarrow{u_r}$.

I/C Application : pendule simple

I/C) 1 Tension d'un fil

Définition M3.5 : Tension d'un fil

Un point matériel M accroché à un fil tendu subit de la part de ce fil une force appelée **tension du fil** et notée \vec{T} telle que

avec $\overrightarrow{u_r}$ un vecteur unitaire dirigé **du point d'accroche vers M**.

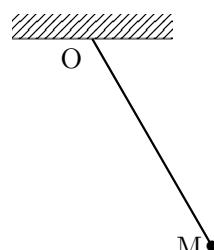


FIGURE M3.7

♥ Implication M3.3 : Condition de tension

I/C 2 Équation du mouvement

♥ Propriété M3.7 : Mouvement d'un pendule simple

Soit un point matériel M de masse m accroché à un fil de longueur $\ell = \text{cte}$ dans le champ de pesanteur \vec{g} . On l'écarte de la verticale d'un angle $\theta_0 \neq 0$ avec une vitesse initiale nulle. Pour θ_0 suffisamment faible, on obtient

Équation différentielle
Solution

avec

♥ Démonstration M3.7 : Mouvement pendule simple

1 Système et référentiel : {masse} point M dans $\mathcal{R}_{\text{labo}}$ supposé galiléen

2 Repère : ; repérage :

Conditions initiales :

3 Bilan des forces.

5 PFD.

6 Équations scalaires. On projette le PFD sur les axes :

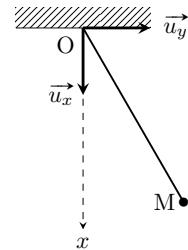


FIGURE M3.8 – [4]

qui constitue l'équation du mouvement du pendule. Sous cette forme, elle est **non-linéaire** donc non résoluble analytiquement avec nos outils ; elle peut l'être numériquement, voir Capytale (code a7c5-1241282). En revanche, **dans l'approximation des petits angles**, on a $\sin(\theta) \approx \theta$, et ainsi on obtient :

C'est !

7 Résolution. On a la solution générale homogène :

$$\text{or } \left. \begin{array}{l} \text{d'où} \\ \text{d'où} \end{array} \right\}$$

Remarque M3.2 : Pendule simple grands angles

Dans cette approximation, la période ne dépend **ni de la masse, ni de l'angle initial**. En réalité, si on s'écarte beaucoup de la verticale ($|\theta| > \pi/4$), la période change et n'est plus celle que l'on a aux petits angles. Voir le changement sur le graphique ci-dessous et [en ligne](#).

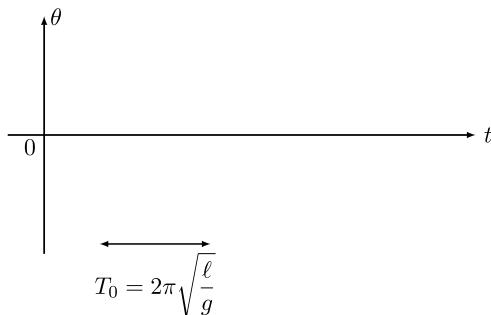


FIGURE M3.9 – $\theta(t)$ pour petits angles.

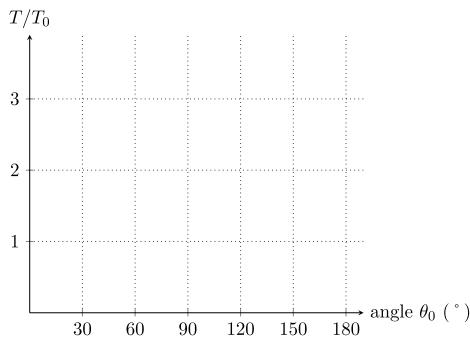


FIGURE M3.10 – Évolution de T selon θ_0 .

Application M3.1 : Mesure de g par un pendule

Déterminer l'accélération de la pesanteur g par l'expérience du pendule simple.

II Mouvement courbe dans l'espace

II/A Coordonnées cylindriques

♥ Définition M3.6 : Coordonnées cylindriques

Le repère cylindrique est constitué d'une origine O autour de laquelle sont définis trois vecteurs $(\vec{u}_r, \vec{u}_\theta, \vec{u}_z)$, avec

- ◊
- ◊
- ◊
- ◊

La détermination de la vitesse et de l'accélération est la même qu'en polaires, il suffit d'ajouter les dérivées de z puisque \vec{u}_z est fixe dans le temps.

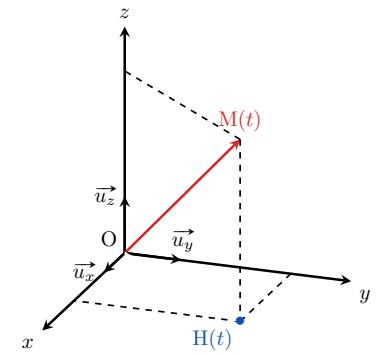


FIGURE M3.11 – Cylindriques.

Important M3.1 : Bilan : coordonnées cylindriques

- ◊ Variables :
- ◊ Vecteurs de base :
- ◊ Position :
- ◊ Vitesse :
- ◊ Déplacement élém. :
- ◊ Accélération :

♥ Implication M3.4 : Volume élémentaire cylindriques

Une conséquence fondamentale du déplacement élémentaire est de pouvoir définir une **surface et un volume infinitésimaux** suivant une variation infinitésimale des trois coordonnées.

En effet, pour une petite variation $(dr, d\theta, dz)$, on se déplace de dr dans la direction \vec{u}_r , de dz dans la direction \vec{u}_z et l'arc de cercle formé par la variation d'angle $d\theta$ est de longueur $r d\theta$. Le **volume** élémentaire est alors le **produit des trois composantes de $d\vec{OM}$** :

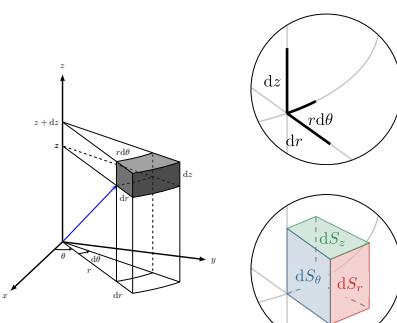


FIGURE M3.12 –
dV cylindriques.

FIGURE M3.13 –
Zoom volume.

On trouve le volume d'un cylindre de rayon R et de hauteur h en intégrant sur les trois coordonnées :

On retrouve l'aire d'un disque multiplié par la hauteur !



Attention M3.2 : Choix des coordonnées

Dans un problème de mécanique, on choisit les coordonnées judicieusement en fonction des symétries du système. **Sauf proposition de l'énoncé**, on utilisera les coordonnées **cylindriques** pour les mouvements de **rotation**. On utilisera les coordonnées cartésiennes sinon.

II/B Coordonnées sphériques



♥ Définition M3.7 : Repère sphérique

Le repère sphérique est constitué d'une origine O autour de laquelle sont définis trois vecteurs, $(\vec{u}_r, \vec{u}_\theta, \vec{u}_\varphi)$, tels que

avec et

avec $\widehat{(\cdot, \cdot)}$ l'**angle orienté**, $H(t)$ projeté orthogonal de $M(t)$ sur le plan xy . **⚠ $\varphi(t)$ correspond à $\theta(t)$ des coordonnées polaires.** On remonte aux coordonnées cartésiennes par

et

⇒ {

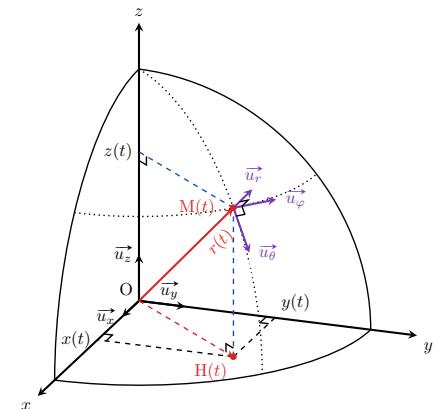


FIGURE M3.14 – Sphériques.



Notation M3.1 : Coordonnées sphériques

- ◊ $\theta \in [0 ; \pi]$ est la **colatitude**, avec
 - ◊ $\lambda = |\pi/2 - \theta| > 0$ est la **latitude** ;
 - ◊ $\varphi \in [0 ; 2\pi]$ est nommé **longitude**, et respecte
 - ◊ Une courbe $\theta(t) = \text{cte}$ est appelée **parallèle** ; le **rayon** d'un parallèle est _____.
 - ◊ Une courbe $\varphi(t) = \text{cte}$ est appelée **méridien** ; le **rayon** d'un méridien est _____.



Exemple M3.2 : Repérage sphérique sur Terre

Le repérage sur la Terre utilise la latitude et la longitude. Le lycée POTHIER se situe à 47,90°N, 1,90°E, soit



Implication M3.5 : Déplacement et volume élémentaire sphérique

- ◊ Variation $dr \Rightarrow$ déplacement de _____
 - ◊ Variation $d\theta \Rightarrow$ déplacement de _____
 - ◊ Variation $d\varphi \Rightarrow$ déplacement de _____
 - ◊ Ainsi
 - ◊ D'où le volume élémentaire :

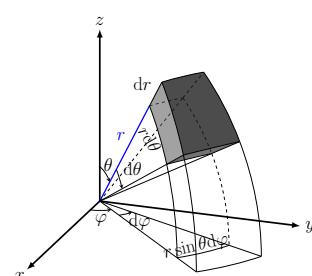


FIGURE M3.15 –
 $\vec{d\Omega_M}$ sphériques

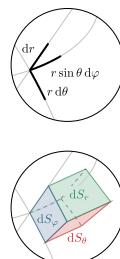


FIGURE M3.16 –
Zoom volume.