

Mécanique en référentiel non-galiléen

En première année, le caractère galiléen d'un référentiel a été introduit comme un préalable à l'application du principe fondamental de la dynamique. Seulement, tous les référentiels ne sont pas galiléens. L'objectif principal de ce chapitre est de se doter d'outils permettant de travailler dans les référentiels non-galiléens.

Pour cela, on précisera ce qu'est un référentiel et comment bouge un référentiel par rapport à un autre, on effectuera des changements de référentiels et enfin on travaillera en référentiel non-galiléen.

A. Mouvement d'un référentiel par rapport à un autre

A.1 Notion de référentiel

L'étude du mouvement d'un système est dépendant du lieu où est situé l'observateur et de son mouvement propre.

Exemple

Prenons comme cas d'étude la valve d'une roue de vélo dont on cherche à étudier le mouvement. Le vélo avance avec une vitesse constante. On peut placer la "caméra" sur trois solides différents.

- ① Si on place la caméra sur le sol, on observe une trajectoire de type cycloïde (figure 1). Notons $\mathcal{R}_1$ ce référentiel.
- ② Si on place la caméra sur le cadre du vélo, toujours face à la roue, on observe une trajectoire circulaire. Notons $\mathcal{R}_2$ ce référentiel.
- ③ Enfin, si on place la caméra sur la roue, toujours face à cette roue, la valve apparaît immobile sur la vidéo. Notons $\mathcal{R}_3$ ce référentiel.

Ces trois exemples montrent qu'il est obligatoire de déterminer un solide de référence pour pouvoir décrire le mouvement d'un système : un cadre spatial est nécessaire.

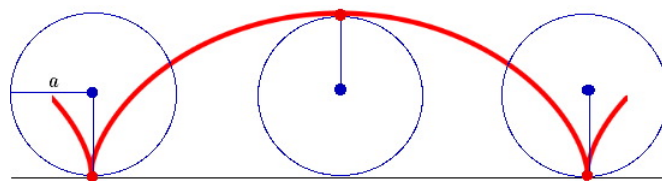


FIGURE 1 – Trajectoire cycloïdique de la valve

Définition M2.1 - Référentiel

Le référentiel d'une étude mécanique est le cadre spatio-temporel de l'étude. Ce référentiel est constitué de 3 axes liés à un solide de référence et d'une horloge.

A.2 Mouvement relatif de deux référentiels

A.2.1 Cas de la translation

Définition M2.2 - Translation de $\mathcal{R}'/\mathcal{R}_0$

Deux référentiels $\mathcal{R}'$ et $\mathcal{R}_0$ sont en translation si les systèmes d'axes de chaque référentiel restent orientés de la même façon l'un par rapport à l'autre au fil du temps.

En particulier, si les systèmes d'axes sont parallèles, ils le restent au cours du mouvement.

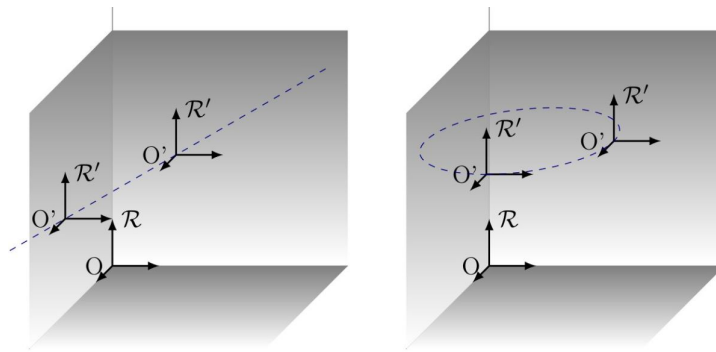


FIGURE 2 – Mouvements de translation (rectiligne et circulaire) de deux référentiels

Le mouvement de $\mathcal{R}'/\mathcal{R}_0$ est donc caractérisé par la vitesse $\vec{v}_{\mathcal{R}'/\mathcal{R}_0}$ appelée vitesse d'entraînement ($\vec{v}_e$).

Dans le cas d'une translation, $\vec{v}_e$ est **uniforme**, c'est-à-dire le même quelque soit le point du référentiel, à l'instant t . $\vec{v}_e$ n'est pas forcément une constante du temps, et peut varier dans le temps en direction et norme.

On peut distinguer deux cas particuliers de translation :

- **Translation rectiligne** : les deux référentiels sont en translation rectiligne si le vecteur vitesse $\vec{v}_e$ garde la même direction dans le temps. C'est le cas des référentiels $\mathcal{R}_2$ et $\mathcal{R}_1$ de l'exemple traité auparavant.
- **Translation circulaire** : Chaque point du référentiel décrit un cercle dans l'autre référentiel. C'est une translation donc, à chaque instant, tout les points du référentiel sont animés de la même vitesse $\vec{v}_e$. C'est le cas d'une nacelle dans une grande roue. Il ne faut surtout pas confondre translation circulaire et rotation.

A.2.2 Cas de la rotation uniforme autour d'un axe fixe

Le mouvement du solide de référence du référentiel $\mathcal{R}'$ par rapport à $\mathcal{R}_0$ est une rotation. Elle est complètement caractérisée par le vecteur-rotation $\vec{\Omega}_{\mathcal{R}'/\mathcal{R}_0}$.

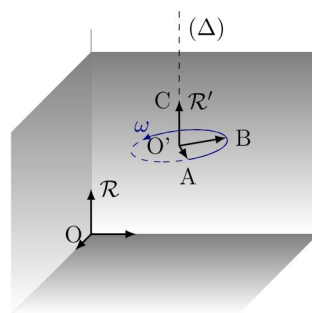


FIGURE 3 – Mouvements de rotation de deux référentiels

Le programme indique qu'il faut se cantonner au cas de la rotation autour d'un axe fixe à vitesse angulaire constante. Dans ce cadre, la direction du vecteur rotation $\vec{\Omega}_{\mathcal{R}'/\mathcal{R}_0}$ reste la même ainsi que la valeur $\Omega_{\mathcal{R}'/\mathcal{R}_0}$ ce qui est contenu dans l'égalité suivante :

$$\frac{d\vec{\Omega}_{\mathcal{R}'/\mathcal{R}_0}}{dt} = \vec{0}$$

C'est par exemple le cas du référentiel $\mathcal{R}_3$ par rapport à $\mathcal{R}_1$ ou de $\mathcal{R}_3$ par rapport à $\mathcal{R}_2$.

Remarque

De façon générale, le mouvement d'un référentiel par rapport à un autre est la composition d'un mouvement de translation et d'un mouvement de rotation.

A.3 Quelques référentiels

De nombreux référentiels peuvent être utilisés pour résoudre des problèmes de mécanique. Nous listons ici les plus utilisés.

Référentiel héliocentrique : Ce référentiel a pour centre le centre du soleil et son système d'axes est dirigé vers trois étoiles lointaines et fixes.

Référentiel de COPERNIC : Ce référentiel a pour centre le centre de gravité du système solaire et son système d'axes est dirigé vers trois étoiles lointaines et fixes. Notons que le centre est décalé par rapport au centre du soleil notamment à cause de l'imposante Jupiter.

Référentiel géocentrique : Ce référentiel conserve le même système d'axes que le référentiel héliocentrique et son centre est celui de la Terre. Ce référentiel est en translation elliptique par rapport au référentiel héliocentrique.

Référentiel terrestre : C'est un référentiel lié à la Terre. Il est donc en rotation par rapport au référentiel géocentrique.

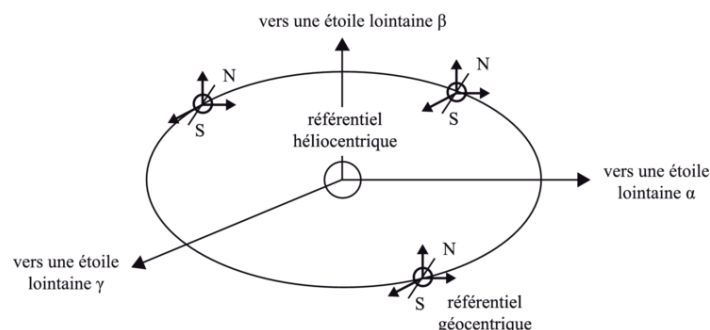


FIGURE 4 – Mouvement du référentiel géocentrique dans le référentiel héliocentrique

B. Compositions des mouvements

B.1 Formule de dérivation composée

Propriété M2.1 - Formule de dérivation composée

Les dérivées temporelles d'un vecteur $\vec{A}$ dans deux référentiels $\mathcal{R}_0$ et $\mathcal{R}'$ sont liées entre elles par la formule de dérivation composée dite de VARIGNON :

$$\left. \frac{d\vec{A}}{dt} \right|_{\mathcal{R}_0} = \left. \frac{d\vec{A}}{dt} \right|_{\mathcal{R}'} + \vec{\Omega}_{\mathcal{R}'/\mathcal{R}_0} \times \vec{A}$$

$\vec{\Omega}_{\mathcal{R}'/\mathcal{R}_0}$ est le vecteur rotation du référentiel $\mathcal{R}'$ par rapport à $\mathcal{R}_0$. Le terme $\vec{\Omega}_{\mathcal{R}'/\mathcal{R}_0} \times \vec{A}$ est uniquement à la rotation des deux référentiels.

Sans cette rotation ($\vec{\Omega}_{\mathcal{R}'/\mathcal{R}_0} = \vec{0}$), les dérivées dans les deux référentiels sont identiques.

B.2 Cas de la translation de $\mathcal{R}'/\mathcal{R}_0$

On s'intéresse dans cette partie à deux référentiels $\mathcal{R}'$ et $\mathcal{R}_0$ en translation l'un par rapport à l'autre. Le centre de $\mathcal{R}_0$ est noté O et celui de $\mathcal{R}'$ est noté O' .

B.2.1 Vitesse

On cherche à relier la vitesse du point M dans le référentiel $\mathcal{R}_0$ et la vitesse de M dans le référentiel $\mathcal{R}'$.

Démonstration : Composition des vitesses en translation

Commençons par écrire la vitesse de M dans $\mathcal{R}_0$.

$$\begin{aligned}
 \vec{v}_{\mathcal{R}_0}(M) &= \left. \frac{d\vec{OM}}{dt} \right|_{\mathcal{R}_0} \\
 &= \left. \frac{d\vec{OO'}}{dt} \right|_{\mathcal{R}_0} + \left. \frac{d\vec{O'M}}{dt} \right|_{\mathcal{R}_0} \\
 &= \vec{v}_{\mathcal{R}_0}(O') + \left. \frac{d\vec{O'M}}{dt} \right|_{\mathcal{R}'} + \vec{\Omega}_{\mathcal{R}'/\mathcal{R}_0} \times \vec{O'M} \quad \text{grâce la formule de VARIGNON} \\
 &= \vec{v}_{\mathcal{R}_0}(O') + \left. \frac{d\vec{O'M}}{dt} \right|_{\mathcal{R}'} \quad \text{car le vecteur rotation est nul} \\
 \vec{v}_{\mathcal{R}_0}(M) &= \vec{v}_{\mathcal{R}_0}(O') + \vec{v}_{\mathcal{R}'}(M)
 \end{aligned}$$

Résultat M2.1 - Composition des vitesses en translation

Si deux référentiels $\mathcal{R}_0$ et $\mathcal{R}'$ sont en translation, la composition des vitesses s'écrit :

$$\vec{v}_{\mathcal{R}_0}(M) = \vec{v}_{\mathcal{R}_0}(O') + \vec{v}_{\mathcal{R}'}(M)$$

Remarques

- ① Le vecteur $\vec{v}_{\mathcal{R}_0}(O')$ représente le vecteur vitesse du déplacement de $\mathcal{R}'$ par rapport à $\mathcal{R}_0$; c'est ce que nous avons déjà appelé vitesse d'entraînement $\vec{v}_e$.
- ② Les référentiels $\mathcal{R}_0$ et $\mathcal{R}'$ sont parfois appelés référentiels absolu et relatif. C'est pourquoi on voit parfois noté ainsi le résultat précédent : $\vec{v}_a(M) = \vec{v}_e + \vec{v}_r(M)$.

B.2.2 Accélération

On cherche à trouver une relation entre l'accélération du point M dans le référentiel $\mathcal{R}_0$ et l'accélération de M dans le référentiel $\mathcal{R}'$.

Démonstration : Composition des accélérations en translation

Commençons par écrire l'accélération de M dans $\mathcal{R}_0$.

$$\begin{aligned}
 \vec{a}_{\mathcal{R}_0}(M) &= \left. \frac{d\vec{v}_{\mathcal{R}_0}(M)}{dt} \right|_{\mathcal{R}_0} \\
 &= \left. \frac{d\vec{v}_{\mathcal{R}_0}(O')}{dt} \right|_{\mathcal{R}_0} + \left. \frac{d\vec{v}_{\mathcal{R}'}(M)}{dt} \right|_{\mathcal{R}_0} \\
 &= \vec{a}_{\mathcal{R}_0}(O') + \left. \frac{d\vec{v}_{\mathcal{R}'}(M)}{dt} \right|_{\mathcal{R}'} + \vec{\Omega}_{\mathcal{R}'/\mathcal{R}_0} \times \vec{v}_{\mathcal{R}'}(M) \quad \text{grâce la formule de VARIGNON} \\
 &= \vec{a}_{\mathcal{R}_0}(O') + \left. \frac{d\vec{v}_{\mathcal{R}'}(M)}{dt} \right|_{\mathcal{R}'} \quad \text{car le vecteur rotation est nul} \\
 \vec{a}_{\mathcal{R}_0}(M) &= \vec{a}_{\mathcal{R}_0}(O') + \vec{a}_{\mathcal{R}'}(M)
 \end{aligned}$$

■

Résultat M2.2 - Composition des accélérations en translation

Si deux référentiels $\mathcal{R}_0$ et $\mathcal{R}'$ sont en translation, la composition des vitesses s'écrit :

$$\vec{a}_{\mathcal{R}_0}(M) = \vec{a}_{\mathcal{R}_0}(O') + \vec{a}_{\mathcal{R}'}(M)$$

Remarques

- ① Le vecteur $\vec{a}_{\mathcal{R}_0}(O')$ représente le vecteur accélération du déplacement de $\mathcal{R}'$ par rapport à $\mathcal{R}_0$; on l'appelle accélération d'entraînement $\vec{a}_e$.
- ② En utilisant la terminologie de référentiels absolu et relatif, on note ainsi le résultat précédent : $\vec{a}_a(M) = \vec{a}_e + \vec{a}_r(M)$.

B.3 Cas de la rotation uniforme de $\mathcal{R}'/\mathcal{R}_0$ autour d'un axe fixe

Conformément au programme de MP, on se limite au cas où $\mathcal{R}'$ est en rotation autour d'une axe fixe de $\mathcal{R}_0$. Pour plus de simplicité, on fait le choix $O' = O$.

B.3.1 Vitesse

Comme précédemment, on cherche à relier la vitesse du point M dans le référentiel $\mathcal{R}_0$ et la vitesse de M dans le référentiel $\mathcal{R}'$.

Démonstration : Composition des vitesses en rotation

Commençons par écrire la vitesse de M dans $\mathcal{R}_0$.

$$\begin{aligned}
 \vec{v}_{\mathcal{R}_0}(M) &= \left. \frac{d\vec{OM}}{dt} \right|_{\mathcal{R}_0} = \left. \frac{d\vec{O'M}}{dt} \right|_{\mathcal{R}_0} \\
 &= \left. \frac{d\vec{O'M}}{dt} \right|_{\mathcal{R}'} + \vec{\Omega}_{\mathcal{R}'/\mathcal{R}_0} \times \vec{O'M} \quad \text{grâce la formule de VARIGNON} \\
 \vec{v}_{\mathcal{R}_0}(M) &= \vec{v}_{\mathcal{R}'}(M) + \vec{\Omega}_{\mathcal{R}'/\mathcal{R}_0} \times \vec{OM}
 \end{aligned}$$

■

Résultat M2.3 - Composition des vitesses en rotation uniforme autour d'un axe fixe

Si deux référentiels $\mathcal{R}_0$ et $\mathcal{R}'$ sont en translation, la composition des vitesses s'écrit :

$$\vec{v}_{\mathcal{R}_0}(M) = \vec{v}_{\mathcal{R}'}(M) + \vec{\Omega}_{\mathcal{R}'/\mathcal{R}_0} \times \vec{OM}$$

Remarques

- ① Le terme $\vec{\Omega}_{\mathcal{R}'/\mathcal{R}_0} \times \vec{OM}$ représente la vitesse d'entraînement $\vec{v}_e$, liée à la rotation relative des deux référentiels. On peut noter qu'elle n'est pas la même pour tous les points M du référentiel $\mathcal{R}'$, caractérisant ainsi sa rotation.
- ② Comme précédemment, on a donc : $\vec{v}_a(M) = \vec{v}_e + \vec{v}_r(M)$.

B.3.2 Accélération

Là encore, on cherche à trouver une relation entre l'accélération du point M dans le référentiel $\mathcal{R}_0$ et la l'accélération de M dans le référentiel $\mathcal{R}'$.

Démonstration : Composition des accélérations en rotation uniforme autour d'un axe fixe

Commençons par écrire l'accélération de M dans $\mathcal{R}_0$.

$$\begin{aligned} \vec{a}_{\mathcal{R}_0}(M) &= \left. \frac{d\vec{v}_{\mathcal{R}'}(M)}{dt} \right|_{\mathcal{R}_0} + \left. \frac{d\vec{\Omega}_{\mathcal{R}'/\mathcal{R}_0} \times \vec{OM}}{dt} \right|_{\mathcal{R}_0} \\ &= \left. \frac{d\vec{v}_{\mathcal{R}'}(M)}{dt} \right|_{\mathcal{R}'} + \vec{\Omega}_{\mathcal{R}'/\mathcal{R}_0} \times \vec{v}_{\mathcal{R}'}(M) + \left. \frac{d\vec{\Omega}_{\mathcal{R}'/\mathcal{R}_0}}{dt} \right|_{\mathcal{R}_0} \times \vec{OM} + \vec{\Omega}_{\mathcal{R}'/\mathcal{R}_0} \times \left. \frac{d\vec{OM}}{dt} \right|_{\mathcal{R}_0} \\ &\quad \text{en utilisant la formule de VARIGNON et la dérivation d'un produit} \\ &= \vec{a}_{\mathcal{R}'}(M) + \vec{\Omega}_{\mathcal{R}'/\mathcal{R}_0} \times \vec{v}_{\mathcal{R}'}(M) + \vec{0} + \vec{\Omega}_{\mathcal{R}'/\mathcal{R}_0} \times \left(\left. \frac{d\vec{OM}}{dt} \right|_{\mathcal{R}'} + \vec{\Omega}_{\mathcal{R}'/\mathcal{R}_0} \times \vec{OM} \right) \\ \vec{a}_{\mathcal{R}_0}(M) &= \vec{a}_{\mathcal{R}'}(M) + \vec{\Omega}_{\mathcal{R}'/\mathcal{R}_0} \times \left(\vec{\Omega}_{\mathcal{R}'/\mathcal{R}_0} \times \vec{OM} \right) + 2\vec{\Omega}_{\mathcal{R}'/\mathcal{R}_0} \times \vec{v}_{\mathcal{R}'}(M) \end{aligned}$$

Résultat M2.4 - Composition des accélérations en rotation uniforme autour d'un axe fixe

Si deux référentiels $\mathcal{R}_0$ et $\mathcal{R}'$ sont en rotation uniforme autour d'un axe fixe, la composition des accélérations s'écrit :

$$\vec{a}_{\mathcal{R}_0}(M) = \vec{a}_{\mathcal{R}'}(M) + \vec{a}_e + \vec{a}_C$$

où l'on introduit les accélérations d'entraînement $\vec{a}_e$ et de CORIOLIS $\vec{a}_C$:

$$\begin{aligned} \vec{a}_e &= \vec{\Omega}_{\mathcal{R}'/\mathcal{R}_0} \times \left(\vec{\Omega}_{\mathcal{R}'/\mathcal{R}_0} \times \vec{OM} \right) \\ \vec{a}_C &= 2\vec{\Omega}_{\mathcal{R}'/\mathcal{R}_0} \times \vec{v}_{\mathcal{R}'}(M) \end{aligned}$$

Remarques

- ① Le vecteur $\vec{\Omega}_{\mathcal{R}'/\mathcal{R}_0} \times (\vec{\Omega}_{\mathcal{R}'/\mathcal{R}_0} \times \overrightarrow{OM})$ représente le vecteur accélération d'entraînement $\vec{a}_e$.
- ② En utilisant la terminologie de référentiels absolu et relatif, on note ainsi le résultat précédent : $\vec{a}_a(M) = \vec{a}_e + \vec{a}_r(M) + \vec{a}_c(M)$.

Détaillons un peu le contenu de ces deux accélérations :

- l'expression de l'accélération d'entraînement $\vec{\Omega}_{\mathcal{R}'/\mathcal{R}_0} \times (\vec{\Omega}_{\mathcal{R}'/\mathcal{R}_0} \times \overrightarrow{OM})$ peut être simplifiée. On se place dans un repère cylindrique, l'axe Oz portant le vecteur rotation et on note α l'angle entre les deux vecteurs, $\vec{a}_e = \vec{\Omega}_{\mathcal{R}'/\mathcal{R}_0} \times (\vec{\Omega}_{\mathcal{R}'/\mathcal{R}_0} \times \overrightarrow{OM} \sin \alpha \vec{e}_\theta) = -\Omega_{\mathcal{R}'/\mathcal{R}_0}^2 OM \sin \alpha \vec{e}_r$ soit, en notant H le projeté orthogonal de M sur l'axe de rotation, $\vec{a}_e = -\Omega_{\mathcal{R}'/\mathcal{R}_0}^2 \overrightarrow{HM}$.
- l'accélération de CORIOLIS est nulle si $\vec{v}'_{\mathcal{R}}(M)$ est nulle, donc si le point M est immobile dans le référentiel galiléen. On peut aussi ajouter les cas particuliers où $\vec{\Omega}_{\mathcal{R}'/\mathcal{R}_0} = \vec{0}$ (pas de rotation) ou bien si $\vec{\Omega}_{\mathcal{R}'/\mathcal{R}_0}$ et $\vec{v}'_{\mathcal{R}}(M)$ sont colinéaires.

Remarque

Dans le cas le plus général (hors programme), le mouvement d'un référentiel est la combinaison d'une translation et d'une rotation non uniforme autour d'un axe mobile. Dans ce cas, l'expression de l'accélération de CORIOLIS est identique, mais l'accélération d'entraînement est plus fournie :

$$\vec{a}_e = \vec{a}(O')_{(R)} + \vec{\Omega}_{(R'/R)} \times (\vec{\Omega}_{(R'/R)} \times \overrightarrow{O'M}) + \left. \frac{d\vec{\Omega}_{\mathcal{R}'/\mathcal{R}_0}}{dt} \right|_{\mathcal{R}_0} \times \overrightarrow{O'M}$$

Le premier terme rend compte de la translation. On reconnaît l'accélération centripète dans le second terme. La nouveauté apparaît dès lors que le vecteur rotation $\vec{\Omega}_{\mathcal{R}'/\mathcal{R}_0}$ n'est plus constant en direction (l'axe de rotation n'a plus une direction fixe) ou en norme (la vitesse de rotation n'est plus uniforme)!

C. Dynamique en référentiel non-galiléen

C.1 Lois de la mécanique en référentiel non-galiléen

En MPSI, l'utilisation du principe fondamental de la dynamique était conditionnée par le fait que le référentiel d'étude avait la propriété d'être **galiléen**. Aussi, pour se doter d'un outil qui ne nécessite pas de se placer en référentiel galiléen, supposons le référentiel $\mathcal{R}_0$ **galiléen** et le référentiel $\mathcal{R}'$ qui ne l'est pas a priori.

Appliquons le principe fondamental à un point M , dans le référentiel galiléen $\mathcal{R}_0$.

$$\begin{aligned} m \vec{a}_{\mathcal{R}_0}(M) &= \sum \vec{F}_{\text{ext}} \\ m (\vec{a}_{\mathcal{R}'}(M) + \vec{a}_e + \vec{a}_C) &= \sum \vec{F}_{\text{ext}} \\ m \vec{a}_{\mathcal{R}'}(M) &= \sum \vec{F}_{\text{ext}} - m \vec{a}_e - m \vec{a}_C \end{aligned}$$

On définit alors deux forces d'inertie (ou pseudo-forces) $\vec{f}_{ie}$ et $\vec{f}_{iC}$ qui sont à ajouter au bilan des forces extérieures pour permettre une écriture du principe fondamental en référentiel non-galiléen. Ces deux forces sont définies comme :

$$\begin{aligned} \vec{f}_{ie} &= -m \vec{a}_e && \text{la force d'inertie d'entraînement} \\ \vec{f}_{iC} &= -m \vec{a}_C && \text{la force d'inertie de CORIOLIS} \end{aligned}$$

Ces pseudo-forces sont directement proportionnelles à la masse m du point M (ce qui leur confère le nom de force d'inertie). Par conséquent, leur point d'application est le centre de gravité G du système.

Théorème M2.1 - Principe fondamental de la dynamique en référentiel non-galiléen

Dans un référentiel non-galiléen, le principe fondamental de la dynamique s'écrit :

$$m \vec{a}_{\mathcal{R}'}(M) = \sum \vec{F}_{\text{ext}} + \vec{f}_{ie} + \vec{f}_{iC}$$

où $\vec{f}_{ie}$ et $\vec{f}_{iC}$ sont les forces d'inertie d'entraînement et de CORIOLIS définies comme

$$\vec{f}_{ie} = -m \vec{a}_e \quad \text{et} \quad \vec{f}_{iC} = -m \vec{a}_C$$

Remarques

Le théorème du moment cinétique (TMC) et les théorèmes de l'énergie (TEC et TEM) découlent du principe fondamental de la dynamique. Leur écriture dans un référentiel non-galiléen est donc elle aussi impactée et doit prendre en compte les forces d'inertie.

① TMC : $\left. \frac{d\vec{L}(M)}{dt} \right|_{\mathcal{R}'} = \sum \vec{\mathcal{M}}(\vec{F}_{\text{ext}}) + \vec{\mathcal{M}}(\vec{f}_{ie}) + \vec{\mathcal{M}}(\vec{f}_{iC})$

② Concernant les théorèmes de l'énergie, il faut se poser la question du travail des forces d'inertie

- la force de CORIOLIS est toujours orthogonale au déplacement : elle ne travaille donc pas.
- la force d'inertie d'entraînement, en revanche, possède en général un travail non-nul. Pour ce qui est de la force centrifuge, on peut même montrer qu'elle dérive d'une énergie potentielle $E_p = -\frac{1}{2} m \Omega^2 H M^2 + E_{p0}$

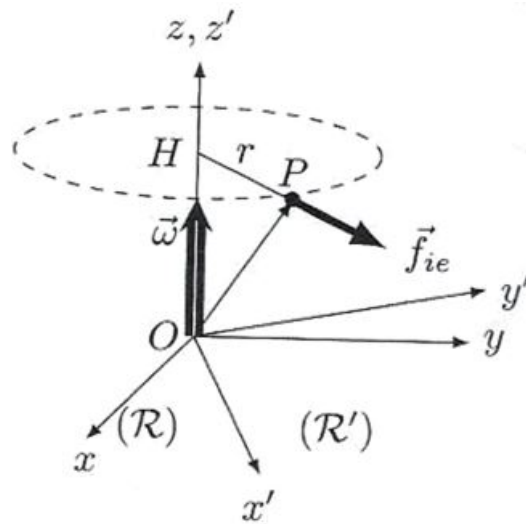


FIGURE 5 – Schématisation de la force d'inertie dite centrifuge

C.2 Exemples

- ① Déterminer la position d'équilibre d'un pendule placé dans une voiture qui accélère en ligne droite avec une accélération de $a = 5 \text{ m.s}^{-2}$.
- ② Déterminer la position d'équilibre d'un pendule placé dans une voiture qui aborde un virage de rayon $R = 40 \text{ m}$ à la vitesse constante de $v = 35 \text{ km.h}^{-1}$.
- ③ Dans un manège, une personne placée à la périphérie lance un ballon vers le centre. Imaginer sa trajectoire.

C.3 Qu'est-ce qu'un référentiel galiléen ?

Plusieurs définitions cohabitent : chacune met en évidence une facette de ce concept.

Une première définition définit quel doit être le mouvement d'un solide isolé dans un référentiel galiléen, à travers le principe d'inertie.

Définition M2.3 - Référentiel galiléen I

Dans un référentiel galiléen, un solide isolé (tel que $\sum \vec{F}_{\text{ext}} = \vec{0}$) est immobile ou en translation rectiligne uniforme.

Si on regarde l'expression du PFD en référentiel non-galiléen, il apparaît que l'accélération dans le référentiel $\mathcal{R}_0$ et celle dans le référentiel $\mathcal{R}'$ sont identiques si les forces d'inertie n'existent pas. Pour satisfaire cette condition, il faut donc que l'accélération d'entraînement soit nulle et que l'accélération de CORIOLIS soit nulle elle aussi ; en d'autres termes, il ne faut ni rotation, ni accélération rectiligne de $\mathcal{R}'$ par rapport à $\mathcal{R}_0$. Le mouvement relatif des deux référentiels est donc un **mouvement rectiligne uniforme**.

Définition M2.4 - Référentiel galiléen II

Un référentiel est galiléen s'il est en translation rectiligne uniforme par rapport à un autre référentiel galiléen.

On est aussi en droit de se poser la question suivante : le référentiel dans lequel l'étude est effectuée peut-il être considéré comme galiléen ? On touche ici à la notion de référentiel approximativement galiléen. En regardant l'expression du PFD, on observe qu'il faut, pour cela, que les forces d'inertie soient négligeables devant les autres efforts.

Définition M2.5 - Référentiel approximativement galiléen

Un référentiel est approximativement galiléen si les effets des forces d'inertie sont négligeables devant ceux des autres efforts. Dans cette définition, la durée du mouvement ou la distance parcourue deviennent des paramètres qui permettent d'annoncer si un référentiel peut, en bonne approximation, être considéré comme galiléen.

C.4 Et le référentiel terrestre ?

Le référentiel terrestre est, de prime abord, non-galiléen : cela est notamment dû à la rotation de la Terre sur elle-même. Cependant, pour faire une expérience de chute libre dans un laboratoire, il sera considéré comme galiléen. En revanche, pour une chute libre effectuée sur des distances plus importantes (quelques centaines de mètres), on observe une déviation du système vers l'Est, manifestation des effets des forces d'inertie. Ceci montre qu'alors, le référentiel terrestre ne peut plus être considéré comme galiléen.

On peut donc citer plusieurs faits expérimentaux qui montrent le caractère non-galiléen du référentiel terrestre : la rotation du plan d'oscillation du pendule de FOUCAULT, la déviation vers l'Est d'un corps en chute libre, le sens de rotation des dépressions (différents entre Nord et Sud), le fait que la verticale d'un lieu ne passe pas rigoureusement par le centre de la Terre.