II. Référentiels non galiléens et forces d'inertie

Introduction

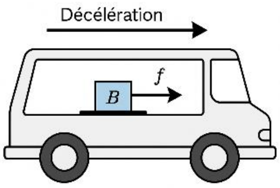
Les lois de Newton décrivent le mouvement des corps dans des référentiels galiléens, où un corps libre suit un mouvement rectiligne uniforme. Or, les référentiels usuels, comme celui lié à la Terre, ne le sont pas strictement, car soumis à des accélérations ou des rotations. Pour y appliquer la dynamique, on introduit des forces fictives (ou d'inertie), sans origine physique, mais qui compensent les effets du mouvement du référentiel. Ce grain présente ces notions et l'adaptation des lois de Newton à ces cas.

II.1. Limite d'application des lois de Newton

Les lois de Newton ne sont strictement valables que dans un référentiel galiléen. Dans tout référentiel *accéléré* ou en *rotation* par rapport à un référentiel galiléen, leur application directe conduit à des incohérences.

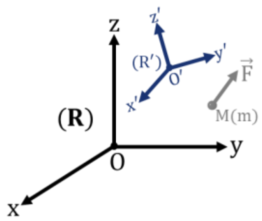
Exemple :

Un objet (B) posé sur une table dans un bus qui freine subit une force vers l'avant dans le référentiel du bus, même si aucune interaction physique réelle ne l'explique.



II.2. Composition des accélérations

Soit R un référentiel galiléen et R′ un référentiel en rotation ou en mouvement quelconque par rapport à R.



L'accélération $\vec{\gamma}(M/R)$ d'un point M dans R se décompose comme suit :

$$\vec{\gamma}(M/R) = \vec{\gamma}(M/R') + \vec{\gamma}_e(M) + \vec{\gamma}_c(M)$$

Où :

- $\vec{\gamma}(M/R')$: accélération de M dans le référentiel mobile R′,
- $\vec{\gamma}_e(M)$: accélération d'entraînement (due à la translation accélérée de R′ par rapport à R),
- $\vec{\gamma}_c(M)$: accélération de Coriolis (due à la rotation de R′ par rapport à R).

II.3. Forces d'inertie

En remplaçant la décomposition de l'accélération dans la deuxième loi de Newton :

$$\sum \vec{F}_{ext} = m\vec{\gamma}(M/R) = m\vec{\gamma}(M/R') + m\vec{\gamma}_e(M) + m\vec{\gamma}_c(M)$$

On obtient alors :

$$m\vec{\gamma}(M/R') = \sum \vec{F}_{ext} + \vec{f}_{inertie}$$

Avec :

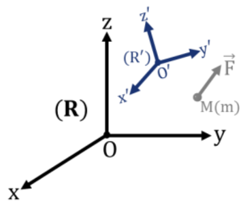
$$\vec{f}_{inertie} = -m\vec{\gamma}_e(M) - m\vec{\gamma}_c(M)$$

Les forces fictives, également appelées forces d'inertie, ne trouvent leur origine dans aucune interaction physique réelle. Elles émergent exclusivement du choix d'un référentiel non galiléen, c'est-à-dire animé d'un mouvement accéléré par rapport à un référentiel galiléen. Dépourvues de support matériel, ces forces traduisent les effets apparents dus à l'accélération du repère d'étude, et doivent être introduites pour préserver la validité des lois de Newton dans de tels référentiels.

II.4. Conditions de validité des lois de Newton dans un référentiel R'

Les lois de Newton restent valables sans correction dans R'seulement si :

1. Le référentiel R' est en translation rectiligne uniforme (accélération nulle) par rapport à un référentiel galiléen ;
2. Le référentiel R' est non tournant (pas de rotation par rapport à R).



Dans ce cas, R' est galiléen par approximation, et l'on peut appliquer directement les lois de Newton sans introduire de forces fictives.

Interprétation physique des forces d'inertie

Selon la nature du mouvement de R', les forces fictives observées sont différentes :

- **Force d'inertie d'entraînement** : due à l'accélération du référentiel. Ex. : dans un ascenseur en montée accélérée, une personne ressent une force « vers le bas » supplémentaire.
- **Force de Coriolis** : liée à la rotation du référentiel. Ex. : dans le référentiel terrestre, cette force est responsable de la déviation des vents (cyclones, anticyclones) dans l'atmosphère.

II.5. Application du premier principe dans un référentiel non galiléen

Dans un référentiel galiléen, le premier principe (*principe d'inertie*) affirme qu'un corps non soumis à des forces conserve son mouvement rectiligne uniforme.

Dans un *référentiel non galiléen*, cela n'est plus vrai. Par exemple :

- Un objet posé sur une table dans un train qui démarre brusquement semble "glisser vers l'arrière", même s'il n'y a aucune force réelle appliquée sur lui.
- Pour rétablir le principe d'inertie, il faut introduire une force fictive d'inertie qui « compense » l'accélération du train.

Ainsi, dans un référentiel accéléré, un corps apparemment en mouvement peut être immobile du point de vue d'un référentiel galiléen, et vice versa. L'introduction des forces fictives permet de conserver l'idée que "l'absence de force réelle conduit à l'absence de mouvement accéléré", mais uniquement après correction.

II.6. Application du deuxième principe dans un référentiel non galiléen

La deuxième loi de Newton, ou principe fondamental de la dynamique, s'applique rigoureusement dans un référentiel galiléen**.** Dans ce cas, on a :

$$\sum \vec{F}_{ext} = m\vec{\gamma}(M/R) = m\vec{\gamma}(M/R') + m\vec{\gamma}_e(M) + m\vec{\gamma}_c(M)$$

Dans un référentiel non galiléen R', cette équation devient incorrecte si on ne tient pas compte des forces d'inertie. Il faut donc écrire :

$$\sum \vec{F}_{ext} + \vec{f}_{inertie} = m\vec{\gamma}(M/R')$$

Autrement dit, pour préserver la validité du principe fondamental de la dynamique dans un référentiel non galiléen, il est nécessaire d'ajouter :

- Une force d'entraînement : $\vec{f}_{ent} = -m\vec{\gamma}_e(M)$
- Si R'est en rotation, la force de Coriolis : $\vec{f}_{cor} = -m\vec{\gamma}_c(M)$

Conditions de validité du PFD sans correction

Pour que le deuxième principe reste valide sans introduire de forces fictives, deux conditions doivent être simultanément vérifiées :

1. Le point origine O' du référentiel R' doit avoir une accélération nulle par rapport à R :

$$\vec{\gamma}_e(M) = \left.\frac{d^2\overrightarrow{OO'}}{dt^2}\right|_R = \vec{0} \qquad \Rightarrow \vec{V}_a(O'/R) = \text{Constante}$$

2. Le référentiel R' ne doit subir aucune rotation par rapport à R :

$$\vec{\gamma}_c(M) = \vec{\omega}_{R'/R} \wedge \vec{V}_r = \vec{0} \qquad \Rightarrow \vec{\omega}_{R'/R} = \vec{0}$$

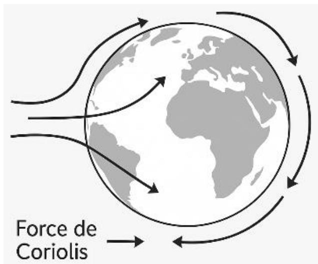
Dans ce cas, les termes $\vec{\gamma}_e(M)$ et $\vec{\gamma}_c(M)$ sont tous deux nuls, ce qui permet d'appliquer directement :

$$\sum \vec{F}_{ext} = m\vec{\gamma}(M/R')$$

On dit alors que le référentiel R' est *en translation rectiligne uniforme* par rapport à un référentiel galiléen, condition nécessaire pour son approximation en tant que référentiel galiléen.

Exemple d'application : dynamique atmosphérique

Un exemple classique d'utilisation des forces fictives est l'étude des mouvements atmosphériques dans le référentiel terrestre. Étant donné que la Terre est en rotation, les masses d'air sont soumises à une force de Coriolis, qui modifie leur trajectoire. Cette force explique la formation des cyclones, la déviation des vents, et le comportement des courants océaniques.



Sans cette correction, les modèles météorologiques seraient totalement incapables de reproduire les phénomènes réels observés à l'échelle planétaire.

Conclusion

Dans un référentiel non galiléen, les lois de Newton ne sont plus directement valables. Pour en conserver l'usage, il est indispensable d'introduire des forces fictives qui compensent l'accélération ou la rotation du repère.

Ces ajustements permettent de maintenir la validité du principe fondamental de la dynamique, même dans des situations complexes telles que celles rencontrées au quotidien (comme dans le référentiel terrestre) ou dans des systèmes en rotation. La compréhension de ces forces fictives est donc essentielle pour l'analyse rigoureuse des systèmes physiques dans des référentiels réels.