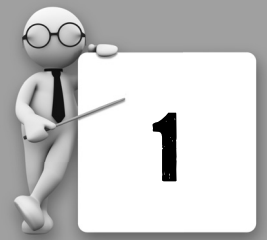
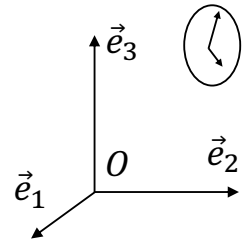


Déterminer le caractère galiléen d'un référentiel



Quand on ne sait pas !

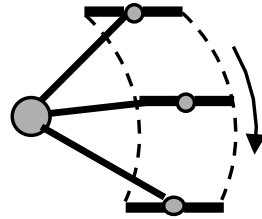
- Un **référentiel** est un outil mathématique permettant de décrire les phénomènes physiques dans l'espace et dans le temps. Il est composé :
 - D'un **point de l'espace** O , qui sert d'origine
 - D'une **base vectorielle** $(\vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_3)$, adaptée à la géométrie du problème
 - D'une **horloge** qui décompose le temps.On prend généralement un solide ou un ensemble de solide pour décrire une position ou un mouvement.



- Un **référentiel galiléen** est un référentiel où le principe d'inertie est vérifié. C'est-à-dire qu'un solide soumis à des forces qui se compensent est animé d'un mouvement de translation rectiligne uniforme dans ce référentiel.
- Le référentiel galiléen par excellence est le référentiel de Copernic (noté \mathcal{R}_C dans la suite) : l'origine est le barycentre du système solaire et la base est composée de trois vecteurs orthonormaux pointant vers des étoiles lointaines, donc fixes.
- Tout référentiel en **translation rectiligne uniforme par rapport à un référentiel galiléen** l'est à son tour. Dans le cas contraire, le référentiel est dit "non galiléen".
- Si le référentiel étudié a un mouvement qui se rapproche d'une translation rectiligne uniforme, on peut faire une approximation sur le caractère galiléen du référentiel, en acceptant une certaine marge d'erreur.

Que faire !

- Pour vérifier qu'un référentiel est galiléen, il faut vérifier qu'il est en :
 - ▶ translation (pas une rotation)
 - ▶ rectiligne (le mouvement est selon une droite)
 - ▶ uniforme (vecteur vitesse constant)



par rapport à un autre référentiel galiléen.

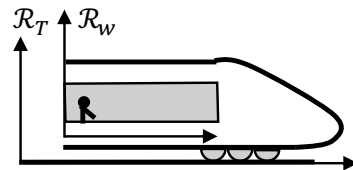
Attention ! Une translation n'est pas forcément rectiligne. Par exemple une pédale de vélo a un mouvement de translation circulaire.

Conseils

- Il faut toujours s'assurer au préalable que le référentiel absolu est lui-même galiléen.
- Le référentiel absolu est galiléen si c'est :
 - le référentiel héliocentrique
 - le référentiel géocentrique, dans le cas où l'étude ne dépasse pas quelques jours
 - le référentiel terrestre, dans le cas où l'étude ne dépasse pas quelques minutes ou heures
 - un référentiel en translation rectiligne uniforme par rapport à l'un de ces trois référentiels.
- Généralement, le caractère galiléen du référentiel relatif est facilement identifiable. Il faut procéder par élimination. Le référentiel ne sera pas galiléen si le mouvement :
 - est une rotation
 - est circulaire ou curviligne
 - n'a pas une vitesse constante.

Exemple traité

On considère le passager d'un TGV qui se déplace dans les wagons. Afin de faciliter l'étude, on décide de prendre le wagon du train pour référentiel, noté \mathcal{R}_w . Pour décrire le mouvement du passager depuis ce référentiel, il faut savoir si les lois de la mécanique classique y sont applicables ou non. Autrement dit, on cherche à savoir si le référentiel du wagon est galiléen ou non. On le repère par rapport au référentiel terrestre \mathcal{R}_T qui, lui, est considéré comme galiléen.



Dans chaque phase du voyage, dire si le référentiel du wagon est galiléen ou non :

- 1 Le train accélère en ligne droite de Paris à Massy jusqu'à atteindre 320 km.h^{-1} .
- 2 Le train stabilise sa vitesse à 320 km.h^{-1} et file en ligne droite jusqu'à Orléans.
- 3 Le train conserve sa vitesse et prend un virage de 30° pour prendre la direction de Tours.
- 4 Le train file en ligne droite en direction de Tours à 320 km.h^{-1} .
- 5 Le train freine à l'approche de Tours.
- 6 Le train est à l'arrêt complet en gare de Tours.

► SOLUTION

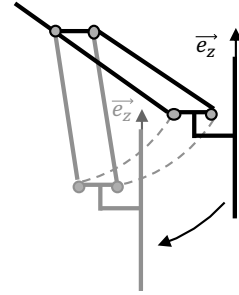
- 1 Le train a un mouvement de translation rectiligne, mais le mouvement est accéléré, il n'est donc pas à vitesse uniforme. Dans ce cas, \mathcal{R}_w n'est pas un référentiel galiléen.
- 2 Le train a une trajectoire de translation rectiligne à vitesse constante (320 km.h^{-1}). Le référentiel \mathcal{R}_w , lié au wagon, a donc un mouvement de translation rectiligne uniforme par rapport au référentiel terrestre \mathcal{R}_T considéré comme galiléen, il est par conséquent lui-même galiléen.
- 3 Le train effectue un virage de 30° . Le référentiel \mathcal{R}_w attaché au wagon n'est donc plus galiléen dans cette phase du trajet.
- 4 Le train a de nouveau une trajectoire de translation rectiligne uniforme (comme dans la question 2). Par conséquent, \mathcal{R}_w est galiléen lors de cette phase du trajet.
- 5 Le train est bien en translation rectiligne, mais il ralentit, par conséquent sa vitesse n'est pas uniforme et \mathcal{R}_w n'est pas galiléen.
- 6 Le train est immobile par rapport au référentiel terrestre \mathcal{R}_T , par conséquent on peut considérer sa trajectoire comme une translation rectiligne de vitesse nulle, donc uniforme. \mathcal{R}_w est donc galiléen dans cette phase du trajet, et on a $\mathcal{R}_w = \mathcal{R}_T$.

Exercices

EXERCICE 1.1 Référentiels galiléens

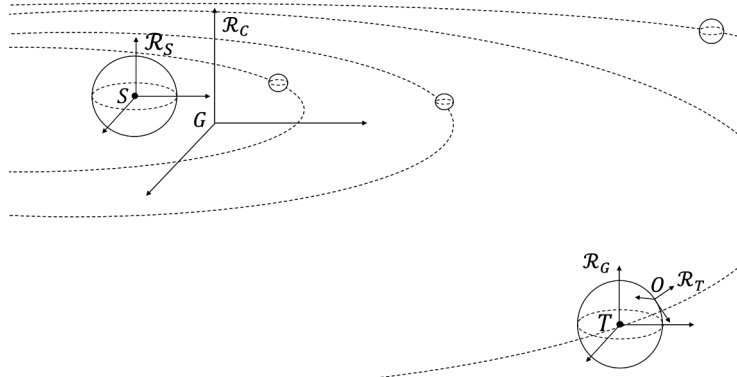
Préciser si le référentiel \mathcal{R}_r est galiléen ou non dans les cas suivants. Justifier la réponse apportée. On suppose que le référentiel terrestre \mathcal{R}_T est galiléen.

- 1 \mathcal{R}_r est fixé à une voiture qui circule à 130 km.h^{-1} sur l'autoroute en ligne droite.
- 2 \mathcal{R}_r est accroché à l'essuie glace d'un bus à l'arrêt. L'essuie glace maintient l'axe \vec{e}_z en position verticale à tout instant.
- 3 \mathcal{R}_r suit le mouvement d'une comète s'approchant d'un astre. L'énergie mécanique de la comète \mathcal{E}_m est négative.
- 4 \mathcal{R}_r est fixé au pied du mât d'une éolienne terrestre.
- 5 \mathcal{R}_r est accroché à un objet en chute libre dans le référentiel terrestre \mathcal{R}_T .
- 6 \mathcal{R}_r est fixé à un passager qui avance dans les couloirs à une vitesse constante de 2 km.h^{-1} en ligne droite dans un train qui file droit vers Paris à 320 km.h^{-1} .
- 7 \mathcal{R}_r est posé sur le sol lors d'un séisme.
- 8 \mathcal{R}_r est fixé à un navire de croisière qui avance à 22 nd par mer calme.



EXERCICE 1.2 Référentiel géocentrique et référentiel terrestre

On se propose de vérifier la nature galiléenne des référentiels couramment utilisés : le référentiel héliocentrique \mathcal{R}_S , le référentiel géocentrique \mathcal{R}_G et le référentiel terrestre \mathcal{R}_T .



- 1
 - a. Donner la définition du référentiel héliocentrique \mathcal{R}_S (son origine et l'orientation des axes de sa base). Décrire le mouvement de son origine dans le référentiel de Copernic \mathcal{R}_C . Les axes sont-ils fixes dans \mathcal{R}_C ? En déduire si le référentiel héliocentrique \mathcal{R}_S est galiléen ou non.
 - b. En supposant que l'origine S du référentiel héliocentrique \mathcal{R}_S soit confondue avec l'origine G de \mathcal{R}_C , discuter de la nature galiléenne de \mathcal{R}_S . Quelles hypothèses nous ont permis d'identifier l'origine de \mathcal{R}_S à celle de \mathcal{R}_C ?
- 2
 - a. Donner la définition du référentiel géocentrique \mathcal{R}_G (son origine et l'orientation des axes de sa base). Décrire le mouvement de son origine par rapport au référentiel héliocentrique \mathcal{R}_S . Les axes sont-ils fixes dans \mathcal{R}_S ? En déduire si le référentiel héliocentrique \mathcal{R}_G est galiléen ou non.

- b. Quelle approximation sur la trajectoire de la Terre peut-on faire si l'on étudie un phénomène sur quelques jours seulement ?
 - c. Dans le cas où le phénomène étudié ne dépasse pas quelques jours, le référentiel géocentrique \mathcal{R}_G peut-il être considéré comme galiléen ?
- 3**
- a. Donner la définition du référentiel terrestre \mathcal{R}_T (son origine et l'orientation des axes de sa base). Décrire le mouvement de son origine par rapport au référentiel géocentrique \mathcal{R}_G . Les axes sont-ils fixes ? En déduire si le référentiel terrestre \mathcal{R}_T est galiléen ou non.
 - b. Quelle approximation sur la trajectoire d'un point à la surface de la Terre peut-on faire si l'on étudie un phénomène sur quelques minutes seulement ?
 - c. Dans le cas où le phénomène étudié ne dépasse pas quelques minutes, le référentiel terrestre \mathcal{R}_T peut-il être considéré comme galiléen ?

EXERCICE 1.3 Choix d'un référentiel d'étude

Dans chacune des études suivantes, dire s'il est préférable de l'étudier dans le référentiel héliocentrique \mathcal{R}_S , géocentrique \mathcal{R}_G ou bien terrestre \mathcal{R}_T . Discuter de la nature galiléenne de ces référentiels suivant les conditions de l'étude.

- 1 Le mouvement d'une comète qui se rapproche de la Terre pendant quelques jours.
- 2 Le mouvement du transsibérien qui relie Moscou à Vladivostok en une semaine.
- 3 Le mouvement d'un chariot d'une montagne russe dans une fête foraine.
- 4 Le mouvement d'un missile terre-terre qui bombarde une base ennemie en quelques minutes.
- 5 Le mouvement d'un satellite géostationnaire pendant une dizaine d'années.
- 6 Le mouvement d'une pomme qui tombe d'un arbre.
- 7 Les courants océaniques sur une échelle de 30 ans.
- 8 Le mouvement d'une particule chargée pendant quelques secondes dans un laboratoire.

Pour vous aider à démarrer

EXERCICE 1.1 Le mouvement d'une comète d'énergie \mathcal{E}_m négative est une ellipse dont le foyer est le barycentre comète-astre autour duquel elle gravite.

EXERCICE 1.2 Pour résoudre cet exercice, il faut d'abord se souvenir des lois de Kepler vues en première année. Ces lois permettent de décrire le mouvement des astres. Celle qui nous intéresse plus particulièrement est la première : « Les planètes du système solaire parcourent des trajectoires elliptiques dont le Soleil occupe l'un des foyers ». On se souviendra que cette affirmation est déjà une approximation de la réalité...

EXERCICE 1.3 Le choix du référentiel d'étude doit se faire de manière à rendre l'étude la plus simple possible, de manière assez indépendante par rapport à la nature galiléenne ou non du référentiel.

EXERCICE 1.1

- 1 \mathcal{R}_r peut être considéré comme galiléen puisqu'il est en translation rectiligne à vitesse constante par rapport à \mathcal{R}_T qui est considéré comme galiléen.
- 2 \mathcal{R}_r ne peut pas être considéré comme galiléen puisque le mouvement de son origine n'est pas rectiligne. Même s'il s'agit d'une translation, elle est circulaire et non rectiligne.
- 3 \mathcal{R}_r ne peut pas être galiléen puisque la première loi de Kepler stipule que sa trajectoire est elliptique dont l'un des foyers est l'astre autour duquel elle gravite (en réalité, c'est le barycentre astre-comète).
- 4 \mathcal{R}_r peut être considéré comme galiléen puisqu'il est fixe dans le référentiel terrestre \mathcal{R}_T lui-même considéré comme galiléen.
- 5 \mathcal{R}_r ne peut pas être considéré comme galiléen. Le mouvement de chute libre est certes une translation rectiligne mais il existe un vecteur accélération vers le bas qui accélère l'objet en chute libre : son mouvement est donc accéléré.
- 6 \mathcal{R}_r peut être considéré comme galiléen. Le passager est en translation rectiligne uniforme par rapport au train qui est lui-même en translation rectiligne uniforme par rapport au sol.
- 7 \mathcal{R}_r n'est pas considéré comme galiléen puisque lors du séisme le référentiel terrestre \mathcal{R}_T n'est plus galiléen, il est soumis à des vibrations.
- 8 \mathcal{R}_r peut être considéré comme galiléen si le navire avance en ligne droite et s'il n'y a pas de houle. Dans le cas contraire, \mathcal{R}_r ne sera pas considéré comme galiléen.

EXERCICE 1.2

- 1 a. Le référentiel héliocentrique \mathcal{R}_S est le référentiel dont l'origine correspond au barycentre du Soleil et dont les axes pointent vers trois étoiles lointaines supposées fixes.
L'origine de \mathcal{R}_S étant le barycentre S du Soleil, son mouvement dans \mathcal{R}_C est une ellipse dont le foyer est le barycentre du système solaire. Les axes pointant vers trois étoiles lointaines et fixes, on peut supposer que les vecteurs de la base sont fixes dans \mathcal{R}_C .
Le référentiel héliocentrique \mathcal{R}_S ayant une trajectoire elliptique autour du barycentre du système solaire (qui est l'origine G du référentiel de Copernic \mathcal{R}_C), on en déduit que \mathcal{R}_S n'est pas rigoureusement galiléen.
- b. Si l'origine de \mathcal{R}_S est confondue avec celle de \mathcal{R}_C , alors les deux référentiels sont confondus. Comme le référentiel de Copernic \mathcal{R}_C est le référentiel galiléen par excellence, alors le référentiel héliocentrique \mathcal{R}_S l'est aussi. Pour arriver à cette conclusion, il faut supposer au préalable que le barycentre du soleil est confondu avec le barycentre du système solaire. Rigoureusement c'est faux, mais compte tenu

de la masse des astres très faible comparée à celle du Soleil (la masse du Soleil est 1000 fois supérieure à la masse de Jupiter elle-même 300 fois supérieure à la masse de la Terre), on peut supposer l'approximation cohérente.

- 2 a. Le référentiel géocentrique \mathcal{R}_G est le référentiel dont l'origine correspond au barycentre de la Terre et dont les axes pointent vers trois étoiles lointaines supposées fixes.

L'origine de \mathcal{R}_G étant le barycentre T de la Terre, son mouvement dans le système solaire est une ellipse dont le foyer est le barycentre du système solaire. Les axes pointant vers trois étoiles lointaines et supposées fixes, on peut en déduire que les vecteurs de la base sont fixes.

Le référentiel géocentrique \mathcal{R}_G ayant une trajectoire elliptique autour du barycentre du système solaire (qui est l'origine du référentiel de Copernic \mathcal{R}_C), on en déduit que \mathcal{R}_G n'est pas rigoureusement galiléen.

- b. Concernant le caractère uniforme de la trajectoire, il faut se souvenir que les planètes sont accélérées au moment où elles sont le plus proche du Soleil. Or, la Terre a une trajectoire que l'on peut approximer à un cercle. Par conséquent, la loi des aires de Kepler permet d'affirmer que sur une trajectoire circulaire, la Terre tourne à vitesse constante.

De plus, si l'on étudie un phénomène sur quelques jours, on peut supposer que la Terre a parcouru une infime portion de sa révolution autour du Soleil. Par conséquent, on peut approximer sa trajectoire circulaire à sa corde. Cette approximation permet d'avoir un mouvement de translation rectiligne dans \mathcal{R}_C .

Attention, ce n'est pas parce que la Terre tourne sur elle-même que le référentiel géocentrique tourne aussi ! Ses axes pointent vers des étoiles lointaines fixes ce qui fait que la Terre tourne aussi dans le référentiel géocentrique.

- c. En résumé, la trajectoire de la Terre peut être approximée à une trajectoire circulaire. Sur quelques jours, cette trajectoire circulaire est approximée à sa corde ce qui permet d'avoir un mouvement de \mathcal{R}_G en translation rectiligne uniforme. Pour l'étude d'un phénomène sur quelques jours dans le référentiel géocentrique \mathcal{R}_G , on dira de ce référentiel qu'il est "considéré comme galiléen".

- 3 a. Le référentiel terrestre \mathcal{R}_T est le référentiel dont l'origine est fixe par rapport au sol et dont l'un des axes (souvent \vec{e}_z) représente la verticale et les deux autres (souvent \vec{e}_x et \vec{e}_y) le plan du sol. L'origine de ce référentiel a donc un mouvement de rotation uniforme par rapport au référentiel géocentrique \mathcal{R}_G . Les axes changent de direction également. \mathcal{R}_T n'est donc pas rigoureusement galiléen.

- b. Si l'étude du phénomène dure quelques minutes, la trajectoire d'un point à la surface de la Terre peut s'approximer à une droite parcourue à vitesse constante avec le même modèle que l'approximation galiléenne du référentiel géocentrique \mathcal{R}_G .

- c. En résumé, pour une étude de quelques minutes, on dit que le référentiel terrestre \mathcal{R}_T est "considéré comme galiléen".

EXERCICE 1.3

- 1 Il vaut mieux étudier le mouvement de la comète dans le référentiel géocentrique \mathcal{R}_G . Pour quelques jours, on peut considérer \mathcal{R}_G comme galiléen.
- 2 Il vaut mieux étudier le mouvement du transsibérien dans le référentiel terrestre \mathcal{R}_T . Pour une semaine, il faut considérer \mathcal{R}_T comme non galiléen.
- 3 Le chariot doit être étudié dans le référentiel terrestre \mathcal{R}_T considéré comme galiléen dans la mesure où le phénomène dure quelques minutes.
- 4 Le mouvement du missile doit être étudié dans le référentiel terrestre \mathcal{R}_T qui est ici considéré comme non galiléen. Les applications militaires et la balistique en particulier requièrent une précision telle qu'on ne peut se permettre de négliger les effets de l'inertie liée à la rotation de \mathcal{R}_T .
- 5 Le mouvement du satellite doit être étudié dans le référentiel géocentrique \mathcal{R}_G considéré comme non galiléen.
- 6 La pomme est étudiée dans le référentiel terrestre \mathcal{R}_T considéré comme galiléen pour 2 secondes.
- 7 Les courants océaniques doivent être étudiés dans le référentiel terrestre \mathcal{R}_T considéré comme non galiléen.
- 8 La trajectoire de la particule est étudiée dans le référentiel du laboratoire, qui s'identifie au référentiel terrestre \mathcal{R}_T considéré comme galiléen.