

Chapitre 9

On a le temps

La logique de progression dans ce chapitre est la suivante : nous abordons la notion de temps en nous posons la question de sa mesure : avec quels outils, quels repères, quelles unités, à partir de quelles observations ? La mesure du temps dépend-elle d'un choix de référentiel ?

Le titre du premier paragraphe révèle d'emblée comment nous mesurons le temps : à l'aide de phénomènes physiques périodiques.

Mais cette première partie est en fin de compte un prétexte pour étudier deux grandes catégories de phénomènes périodiques : les mouvements orbitaux de stellites ou de planètes et les mouvements oscillatoires (tous deux étudiés dans le cadre de la mécanique classique).

Nous pourrions clore cette partie en présentant un bref historique de la définition de notre unité S.I. de temps, la seconde.

La deuxième partie abordera le temps du point de vue de la théorie de la relativité restreinte développée par Albert Einstein au début du 20^{ème} siècle : le temps est une coordonnée comme les autres, il a le même statut que les coordonnées d'espace et sa valeur dépend donc du choix du référentiel. L'ensemble des coordonnées d'espace-temps constitue désormais un tout que l'on qualifiera d'évènement.

I - Le temps se mesure à l'aide de phénomènes périodiques

Introduction

Nous reviendrons sur les phénomènes périodiques en nous intéressant aux mouvements périodiques. Nous prolongerons l'étude avec une description historique des outils successifs de mesures du temps.

On peut, en simplifiant, constater qu'il y a deux types de mouvements périodiques

(cas de mouvements sans frottements, et sans apport d'énergie extérieure supplémentaire, c'est-à-dire pour lesquels E_m est constante) :

- Les mouvements de révolution, par exemple la rotation circulaire d'un satellite autour de la Terre : au cours de ce mouvement, E_m est constante avec E_c et E_p qui restent constantes.
- les mouvements d'oscillation pour lesquels E_m reste constante avec transfert d'énergie permanent entre E_c et E_p .

1) Les satellites et les planètes en orbite

a. Introduction : rappels sur la force de gravitation universelle

Une planète ou un satellite en mouvement orbital autour d'un astre central plus lourd est attiré par celui-ci sous l'action d'une force unique, la force de gravitation universelle de valeur (exprimée ci-dessous dans l'exemple de la Terre de masse M_T attirée par le Soleil de masse M_S).

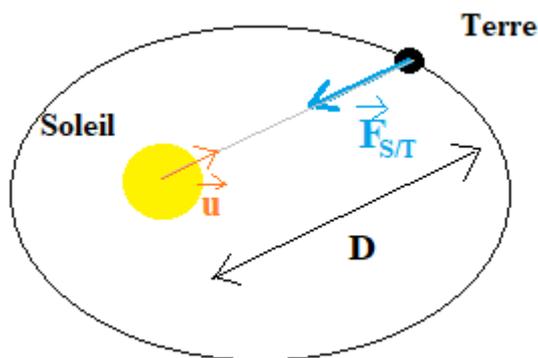
$$F_{S/T} = \frac{G \times M_S \times M_T}{D^2} \quad (1) \quad (D : \text{distance centre S-centre T})$$

G est la constante de gravitation universelle, $G = 6,67 \times 10^{-11}$ S.I.

$F_{S/T}$ est ainsi notée en tant que **force** exercée par le Soleil sur la Terre

Remarque : La troisième loi de Newton précisera que, dans ces conditions, le Terre exerce sur le Soleil une force $F_{T/S}$ de même valeur (mais vectoriellement opposée).

Nous revenons à la force $F_{S/T}$ et nous complétons sa description en présentant le vecteur force correspondant :



$$\vec{F}_{S/T} = -\frac{G \times M_S \times M_T}{D^2} \times \vec{u} \quad (2)$$

\vec{u} est un vecteur unitaire (de valeur 1) qui, associé à la valeur $F_{S/T}$, permet de définir une direction et un sens. La convention choisie est que \vec{u} part de l'astre central (ici, le Soleil) vers la planète en orbite (ici, la Terre), d'où le signe « - » dans l'expression (2).

Cette **force** est dite **centrale**. S'appliquant au centre d'inertie du système (le centre de masse de la Terre), elle est toujours en train de pointer vers le centre du Soleil (vers un point fixe si l'on considère le mouvement dans le référentiel héliocentrique).

Sous l'effet de cette force unique (ou très dominante par rapport aux autres interactions gravitationnelles de la Terre avec d'autres objets plus ou moins proches), la Terre décrit un mouvement périodique orbital autour du Soleil.

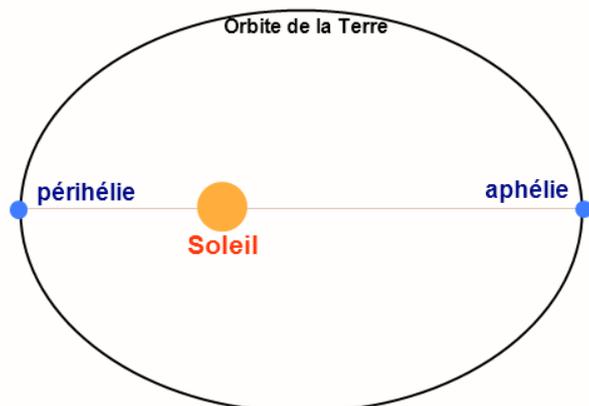
Ces mouvements d'objets célestes visibles par l'homme depuis très longtemps ont été très tôt étudiés sérieusement.

Les lois de Kepler, datant du début du 17^{ème} siècle et basées sur des observations approfondies, sont antérieures aux lois de Newton et sont toujours valables.

b. Les trois lois de Kepler

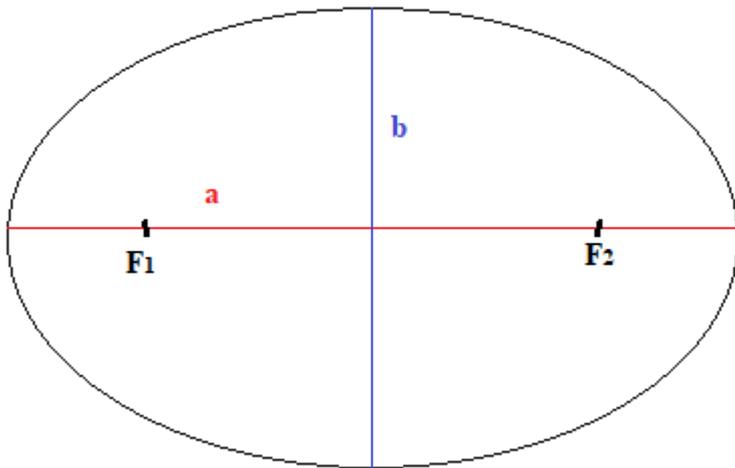
Les définitions des référentiels géocentrique et héliocentrique sont supposées connues et assimilées.

Loi 1 : dans le référentiel héliocentrique, la trajectoire du centre d'une planète est une ellipse dont le Soleil est l'un des foyers (plus précisément : une ellipse telle que le centre du Soleil en occupe l'un des foyers).



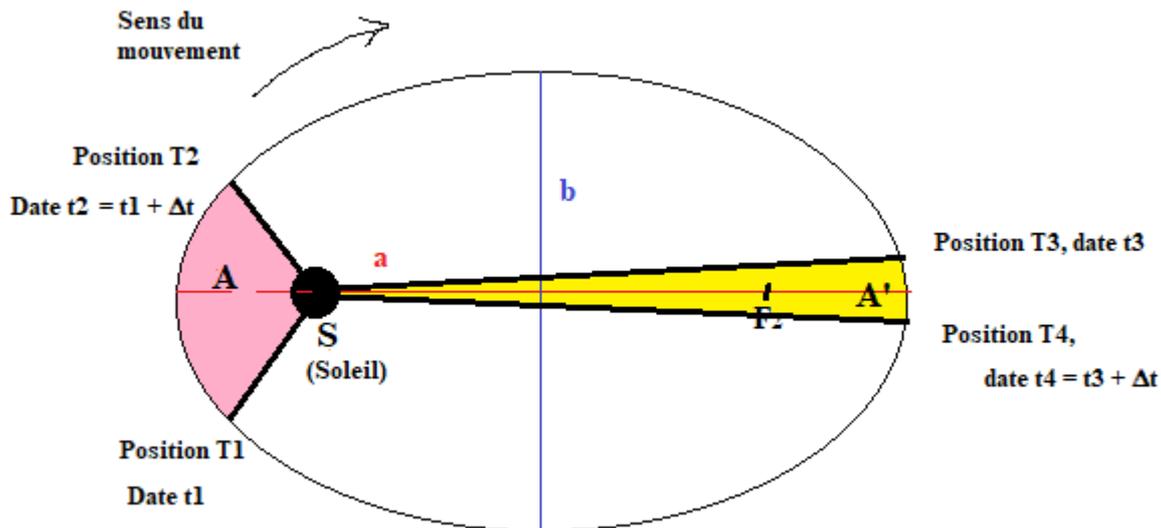
Vous n'avez pas de connaissances particulières à avoir sur les ellipses, mais il faut au moins maîtriser leurs caractéristiques principales.

Par exemple, on ne vous demande pas de savoir comment placer les foyers d'une ellipse, mais vous devez savoir qu'ils existent, et qu'ils sont différents... Sauf dans le cas où l'ellipse devient un cercle et où les foyers sont confondus au centre du cercle.



- F_1 et F_2 sont symétriques par rapport au centre de l'ellipse, celui-ci se trouvant au croisement des deux axes, le petit et le grand.
- On note a la longueur du demi grand axe et b la longueur du demi petit axe.
- Sur le schéma, l'ellipse a été volontairement dessinée au hasard ainsi que le positionnement des deux foyers, on a juste respecté les descriptions précédentes.

Loi 2 : le segment de droite reliant le Soleil à la planète balaye des aires égales pendant des durées égales.



Le segment évoqué dans la loi est présenté aux positions successives ST_1 , ST_2 , ST_3 et ST_4 .

L'aire A (rose) est égale à l'aire A' (jaune). La durée Δt pour aller de T_1 à T_2 et de T_3 à T_4 est la même.

Mais la Terre n'est pas à distance constante du Soleil. Elle doit donc, lorsqu'elle est plus proche du Soleil, se déplacer plus vite et parcourir plus de distance (de T_1 à T_2) sur une durée donnée pour balayer une aire constante. Elle doit, lorsqu'elle est plus éloignée du Soleil, se déplacer moins vite et parcourir moins de distance (de T_3 à T_4) sur une durée donnée pour balayer une aire constante.

Remarque : si l'orbite devient circulaire avec astre au centre, la deuxième loi va désigner un mouvement uniforme, c'est-à-dire tel que la **valeur** de la vitesse est constante.

Loi 3 : pour toutes les planètes du système solaire, le rapport du carré de la période de révolution sur le cube du demi-grand axe de l'ellipse décrite est le même :

$$\frac{T^2}{a^3} = \text{constante}$$

- Cette constante ne dépend pas de la masse de la planète, mais dépend de la masse de l'astre central - ici le Soleil.
- Toutes les planètes d'un même système solaire orbitent donc autour de leur Soleil sur des ellipses caractérisées par différentes valeurs de a et de T, mais par la même valeur de $\frac{T^2}{a^3}$.
- La période T est, on l'aura compris, la durée d'une révolution (d'un tour complet...).

Les énoncés des trois lois de Kepler doivent être connus.

Les lois de Kepler s'appliquent évidemment aussi aux mouvements des satellites de la Terre dans le référentiel géocentrique.

c. Récréation : visualisation à l'aide d'un logiciel de simulation

Le lien : <http://astro.unl.edu/naap/pos/animations/kepler.swf>

The screenshot shows the 'Planetary Orbit Simulator' interface. The main window displays an elliptical orbit around a central body (the Sun). Key parameters shown include the semimajor axis (1.47 AU) and eccentricity (0.400). The interface is divided into several panels:

- Orbit Settings:** Includes a dropdown menu for selecting a planet (currently set to Mercury), input fields for semimajor axis and eccentricity, and sliders for adjusting these values.
- Animation Controls:** Features a 'start animation' button and an 'animation rate (yrs/s)' slider set to 0.20.
- Visualization Options:** Contains checkboxes for 'show solar system orbits', 'show solar system planets', 'label the solar system orbits', and 'show grid'. A 'clear optional features' button is also present.
- Kepler's Laws and Newtonian Features:** A bottom panel with tabs for 'Kepler's 1st Law', 'Kepler's 2nd Law', 'Kepler's 3rd Law', and 'Newtonian Features'. It includes checkboxes for 'show empty focus', 'show semiminor axis', 'show center', 'show semimajor axis', and 'show radial lines'. A table shows the calculation: $r_1 + r_2 = 2 \times a$, with values 1.59 AU + 1.35 AU = 2.94 AU.

Annotations with arrows point to specific features:

- Choix planète:** Points to the planet selection dropdown menu.
- lancer l'animation:** Points to the 'start animation' button.
- choix vitesse:** Points to the 'animation rate' slider.
- Cochage / décochage visualisations diverses:** Points to the 'show solar system orbits' checkbox.
- Voir les autres planètes en même temps que celle choisie:** Points to the 'show solar system planets' checkbox.
- Onglet pour option visualisation des aires balayées:** Points to the 'show radial lines' checkbox.

ETC.

d. Vérifions à l'aide des lois de Newton : étude du mouvement circulaire d'un satellite terrestre

α – Présentation

Où l'on verra que si la trajectoire d'un satellite terrestre est circulaire, le mouvement de ce satellite, soumis à une force centrale de valeur constante, est uniforme (la deuxième loi de Kepler nous l'indiquait déjà). Ce sont les lois de Newton qui vont nous permettre d'avancer... et de retrouver les lois de Kepler.

Notons que la loi de gravitation s'applique aux astres, planètes et satellites, corps non ponctuels, à condition que ces corps soient à répartition de masse sphérique (cela suppose qu'ils sont obligatoirement de forme sphérique). La force a la même expression que pour des corps ponctuels auxquels on affecte la masse totale de chaque corps en interaction et distants de la distance entre les centres des deux corps.

Nous nous intéressons à un satellite de masse m , en orbite à l'altitude h (par rapport à la surface terrestre) autour de la Terre de masse M et de rayon R_T .

La distance entre le centre de la Terre et le satellite, considéré comme ponctuel, est donc le rayon du cercle parcouru $R = R_T + h$

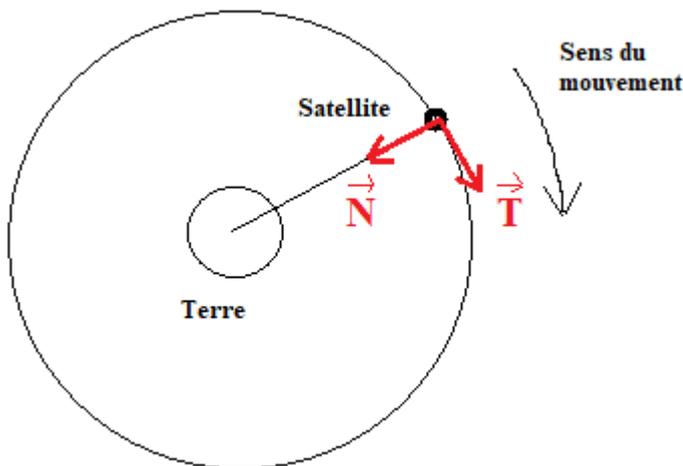
L'expression de la valeur de la force de gravitation terrestre s'exerçant sur la satellite est : $F = \frac{G \times M \times m}{(R_T + h)^2}$.

β – Un bon outil pour l'étude des mouvements curvilignes : le repère de Frenet

On définit la base (le repère) de Frenet : il s'agit d'un *repère mobile* dans le référentiel choisi (ici géocentrique) car son origine est confondue avec le centre d'inertie du système dont on étudie le mouvement.

Le mouvement étant plan, on définit deux axes du repère grâce à deux vecteurs *unitaires* :

- \vec{T} , tangent à la trajectoire et orienté dans le sens du mouvement ;
- \vec{N} , perpendiculaire à \vec{T} et orienté vers l'intérieur de la courbure de la trajectoire.



Dans le cas d'un mouvement circulaire, on note que \vec{N} est en permanence un vecteur central (pointant le centre du cercle décrit par le satellite).

On note aussi que selon la convention choisie pour désigner la direction du vecteur unitaire \vec{u} (voir précédemment la définition de la force de gravitation), on peut écrire :

$$\vec{F} = \frac{G \times M \times m}{(R_T + h)^2} \vec{N} \quad \text{la force } \vec{F} \text{ est entièrement selon la direction normale.}$$

Les coordonnées de \vec{F} dans le repère de Frenet sont donc : $F_T = 0$ $F_N = F$

Nous n'avons pas oublié les notions fondamentales de mécanique classique (chapitre 1) et nous savons que le vecteur vitesse est en permanence tangent à la trajectoire. On peut donc écrire (dans le repère de Frenet) : $\vec{v} = v\vec{T}$ et désigner les coordonnées du vecteur vitesse correspondantes :

$$\mathbf{v}_T = v \quad \mathbf{v}_N = 0$$

Pour l'accélération, on pourrait démontrer (on ne le fait pas et vous apprenez le résultat qui suit par cœur) que les coordonnées du vecteur \vec{a} dans le repère de Frenet sont :

$$\mathbf{a}_T = \frac{dv}{dt} \quad \mathbf{a}_N = \frac{v^2}{R} = \frac{v^2}{R_T + h}$$

R est le rayon de courbure de la trajectoire au point où l'on se trouve.

Si le mouvement est circulaire, R est le rayon du cercle décrit.

Dans le cas d'une rotation autour de la Terre, de rayon R_T , à l'altitude h : $R = R_T + h$

γ – Appliquons la deuxième loi de Newton

- **Référentiel** : l'étude est réalisée dans le référentiel terrestre considéré comme galiléen.
- **Système** : le satellite considéré comme un objet ponctuel de masse m ou ramené à son centre d'inertie et affecté de la masse m .
- **Appliquons la deuxième loi de Newton sous sa forme** : $\sum \vec{F}_{ext} = m \times \vec{a}$.
La seule force qui s'exerce est la force de gravitation terrestre \vec{F} .
La deuxième loi de Newton reste valable avec les coordonnées des vecteurs qu'elle met en relation :

$$F_T = m \times a_T \quad (3)$$

$$F_N = m \times a_N \quad (4)$$

- **Le mouvement est uniforme !**

La relation (3) donne : $0 = m \times \frac{dv}{dt}$

Nous avons donc $\frac{dv}{dt} = 0$

La dérivée par rapport au temps de la valeur de la vitesse est nulle

La valeur de la vitesse est constante (puisque sa dérivée est nulle)

Le mouvement est uniforme.

- **Exprimons cette valeur de vitesse**

La relation (4) donne $\frac{G \times M \times m}{(R_T + h)^2} = m \frac{v^2}{(R_T + h)}$

La relation se simplifie et mène à $v^2 = \frac{G \times M}{(R_T + h)}$

$$v = \sqrt{\frac{G \times M}{(R_T + h)}}$$

δ – Allons plus loin !

- **Expression de T la période de révolution**

Pendant la durée $\Delta t = T$, le satellite parcourt le cercle complet, de périmètre $d = 2\pi(R_T + h)$ à la

vitesse de valeur constante $v = \sqrt{\frac{G \times M}{(R_T + h)}}$

Dans la mesure où le mouvement est uniforme, Nous pouvons développer une relation du type $d = v \times \Delta t$:

$$2\pi(R_T + h) = \sqrt{\frac{G \times M}{(R_T + h)}} \times T$$

Ce qui mène à :

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{(R_T + h)^3}{G \times M}} \quad (5)$$

- **Retrouvons la troisième loi de Kepler**

Nous rappelons d'abord que la longueur du demi grand axe, notée a , est ici le rayon du cercle décrit, soit $R_T + h$.

Nous élevons au carré l'égalité (5) : $T^2 = 4\pi^2 \frac{(R_T+h)^3}{G \times M}$

Soit :

$$\frac{T^2}{(R_T+h)^3} = \frac{4\pi^2}{G \times M} \quad (6)$$

$$\frac{T^2}{a^3} = \frac{4\pi^2}{G \times M} = \text{constante}$$

Valeur constante qui dépend toutefois de la masse M de l'astre central

- **Les satellites géostationnaires.**

Un satellite géostationnaire est un satellite qui reste en permanence à la verticale d'un même point de la surface terrestre.

Sa période de révolution doit donc être la même que la période de révolution de la Terre sur elle-même :

$$T_{\text{géostat}} = 24 \text{ h} = 86400 \text{ s}$$

Exercices à partir de la page suivante...

Exercice 1

A quelle altitude sont positionnés les satellites géostationnaires ?

C'est du calcul : à partir de l'expression (5) ou de l'expression (6), il faut tirer l'expression de h et la calculer.

Données :

$$M = M_T = 5,98 \times 10^{24} \text{ kg}$$

$$R_T = 6,37 \times 10^3 \text{ km (attention l'unité est donnée en km, n'oubliez pas la conversion pour le calcul...)}$$

$$G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ S.I.}$$

$$T = 24 \text{ h (unité...)}$$

Vérifier que h vaut environ $3,6 \times 10^7 \text{ m}$ (36000 km)

Exercice 2 :

Pourquoi n'existe-t-il pas de satellite géostationnaire à la verticale de Tarnos ?

Exercice 3 :

Notre Lune : *Distance centre Terre – centre Lune : 384000 km* *période de révolution 27,3 j*

Vérifier que ces données sont cohérentes avec les relations que nous venons d'établir. Vous prolongerez votre travail en calculant la valeur de la vitesse du centre d'inertie de la Lune dans le référentiel géocentrique.

Exercice 4 :

Données de l'ISS (station spatiale internationale) : *altitude $h = 290 \text{ km}$, période de révolution $T = 90 \text{ min}$*

Expliquez l'expression employée par Thomas Pesquet : « 16 couchers de Soleil !! »

**e. Récréation 2 : installons le formidable logiciel Stellarium : <http://www.stellarium.org/fr>
C'est un simulateur, mais c'est en temps réel sur la base de données réelles...**

Après avoir procédé à l'installation puis lancé l'application, réalisons le paramétrage :

(Ce paramétrage est proposé avec des raccourcis clavier. Vous pouvez aussi cliquer sur les différents boutons qui apparaissent au bas et sur la gauche de l'écran lorsque vous y présentez le pointeur de la souris).

N'hésitez pas à utiliser l'aide (F1 ou bouton « ? » en bas à gauche.



- Choisir une monture équatoriale : Ctrl + M (ou bouton  activé)
- Supprimer le sol : touche « g » pour « Ground »
- Supprimer l'atmosphère : touche « a » pour « Atmosphère »
- Supprimer la brume : touche « f » pour « Fog »
- Afficher date et heure : touche F5
- Afficher le cache circulaire : F2 → outils, puis cocher « cache circulaire »
- Rechercher un astre : touche F3. Taper le nom de l'Astre ; par exemple Jupiter, puis OK
- Se recentrer sur l'astre choisi : appuyer sur la barre d'espace.
- Zoomer vers Jupiter : molette de la souris... On voit apparaître ses satellites. Approchez-vous encore, mais veillez à pouvoir observer les orbites complètes de tous les satellites de Jupiter.
- Ajuster la vitesse d'écoulement du temps (bouton « avance rapide » barre du bas de l'écran. Si Jupiter se met aussi en mouvement, appuyer à nouveau sur la barre d'espace...
- Lorsque vous pointez + cliquez sur n'importe quel astre, les données s'affichent à droite de l'écran (et un coup sur la barre d'espace permet de centrer l'astre choisi).

Vous pouvez maintenant, à titre d'exemple et en notant soigneusement et judicieusement les données qui s'affichent sur l'écran, déterminer les périodes de révolutions des différents satellites de Jupiter, puis vérifier en travaillant sur l'exercice page suivante :

En 1610, Galilée découvre Io, Europe, Ganymède et Callisto, quatre satellites de Jupiter qu'il observe à l'aide de sa lunette astronomique. Il relate ainsi ses observations dans un ouvrage, *Le messager des étoiles*, dans lequel il dessine également ce qu'il voit. Sur ses schémas, Galilée note « Ori. » la direction « Est » et « Occ. » la direction « Ouest ».

« Le 7 janvier de cette année 1610, à la première heure de la nuit, alors que j'observais les étoiles à la lunette, Jupiter se présenta, et comme je disposais d'un instrument tout à fait excellent je reconnus que trois petites étoiles, il est vrai toutes petites mais très brillantes, étaient près de la planète [...]. Je pensais que c'étaient des étoiles fixes mais quelque chose m'étonnait : elles semblaient disposées en ligne droite, parallèlement à l'écliptique, et étaient plus brillantes que le reste des étoiles. Voici quelle était leur position les unes par rapport aux autres et par rapport à Jupiter :

Croquis (a) :



À l'est, se trouvaient deux étoiles, mais une seule à l'ouest [...]. Je ne me préoccupais pas d'abord de leurs distances entre elles et Jupiter car, comme je l'ai dit, je les avais prises pour des étoiles fixes. Mais quand, le 8 janvier, guidé par je ne sais quel destin, je regardais du même côté du ciel, je trouvais une disposition très différente. Les trois petites étoiles étaient en effet toutes à l'ouest de Jupiter et elles étaient plus proches entre elles que la nuit précédente [...], comme le montre le dessin ci-dessous :

Croquis (b) :



[...] Je commençais à me demander avec embarras comment Jupiter pouvait se trouver à l'est de toutes les étoiles fixes mentionnées plus haut alors que la veille il était à l'ouest de deux d'entre elles. »

Les jours suivants, Galilée continue à observer cette région du ciel et réalise une série de croquis à l'échelle. Il comprend que les « étoiles » sont en réalité de petits astres tournant autour de Jupiter comme la Lune tourne autour de la Terre. Le 13 janvier, pour la première fois, il aperçoit quatre petites « étoiles ».

Croquis (c) :



Par rapport à Jupiter, les orbites des satellites sont pratiquement circulaires et appartiennent quasiment au même plan (P) qui est celui de l'équateur de Jupiter. Les orbites sont représentées sur la **figure 1 des documents page 5**. Les positions des satellites sont indiquées à une date donnée. Le schéma a été réalisé sans souci d'échelle.

1) Étude de la trajectoire des satellites de Jupiter observés par Galilée

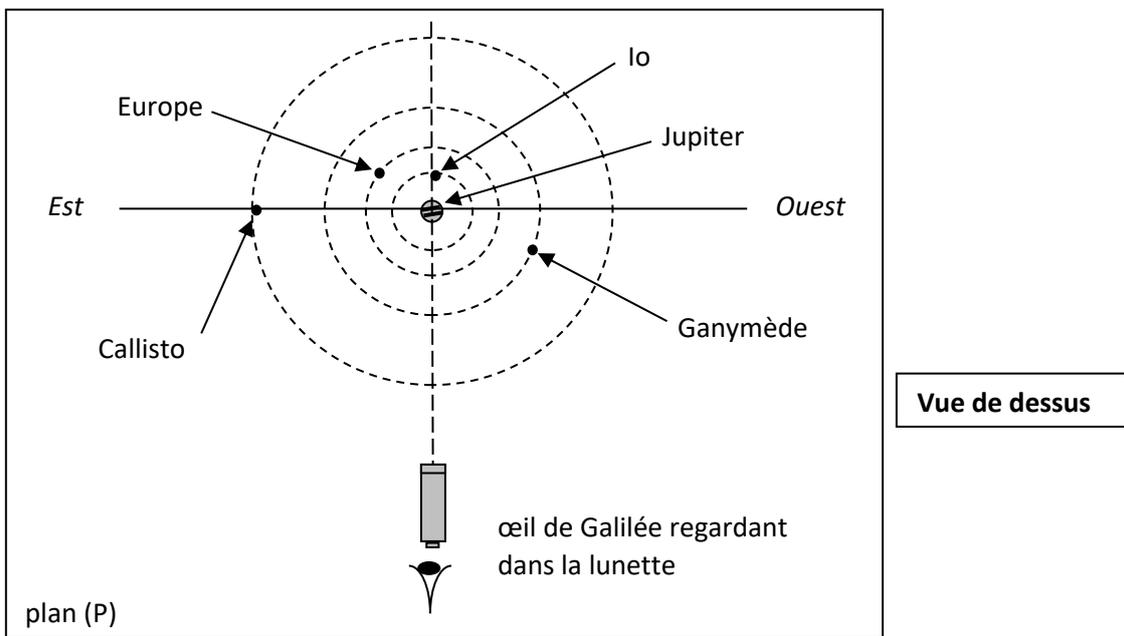
On admet que Galilée, regardant dans sa lunette depuis un point de la Terre, appartient au plan (P) défini précédemment.

- La **figure 1** ci-dessous correspond-elle au croquis (a), (b) ou (c) ci-dessus ? Justifier.
- Donner une raison possible permettant d'expliquer pourquoi les quatre satellites ne sont pas toujours vus en même temps par Galilée.
- Quelle est la trajectoire des satellites de Jupiter vue par Galilée ?

2) Étude de la période de révolution du satellite Callisto autour de Jupiter

La **figure 2** donne les croquis réalisés à l'échelle par Galilée entre le 8 février 1610 et le 2 mars 1610.

- À certaines dates, le satellite Callisto apparaît le plus éloigné de Jupiter pour Galilée. À l'aide de la **figure 1**, justifier cette observation.
- On cherche à déterminer la valeur approchée de la période T_C de révolution de Callisto autour de Jupiter. Le 11 février, Callisto apparaît pour Galilée comme étant le plus éloigné à l'Est (« Ori. ») de Jupiter.
 - À quelle date, Galilée voit-il Callisto à nouveau le plus éloigné à l'Est de Jupiter ?
 - En déduire la valeur approchée de la période T_C . Un résultat en nombre de jours entier est attendu. Est-ce compatible avec le résultat obtenu au 2.7.2 ?



Date	Heure d'observation	Croquis de Galilée (documents d'époque)
8 février 1610	1 h	Ori. * * * = O Occ.
9 février 1610	0 h 30 min	Ori. = * O = Occ.
10 février 1610	1 h 30 min	Ori. * * O Occ.
11 février 1610	1 h	Ori. * * O * Occ.
12 février 1610	0 h 40 min	Ori. * * O = * Occ.
13 février 1610	0 h 30 min	Ori. = * O * * Occ.
14 février 1610	Ciel couvert	
15 février 1610	1 h	Ori. * * O Occ.
16 février 1610	Ciel couvert	
17 février 1610	1 h	Ori. * O = Occ.
18 février 1610	1 h	Ori. * O * * Occ.
19 février 1610	0 h 40 min	Ori. O * * Occ.
20 février 1610	Ciel nuageux	
21 février 1610	1 h 30 min	Ori. * O * * Occ.
25 février 1610	1 h 30 min	Ori. = = O = Occ.
26 février 1610	0 h 30 min	Ori. = O * Occ.
27 février 1610	1 h	Ori. * * O * * Occ.
28 février 1610	1 h	Ori. * O * Occ.
1 mars 1610	0 h 40 min	Ori. = * * * O Occ.
2 mars 1610	0 h 40 min	Ori. * * O * Occ.

Croquis réalisés à l'échelle par Galilée

Et ce n'est pas fini ! Un lien vers un site qui suit en direct tous les satellites terrestres: <http://www.n2yo.com/>

(Attention, il y a de la publicité. Ils ont aussi une page facebook)

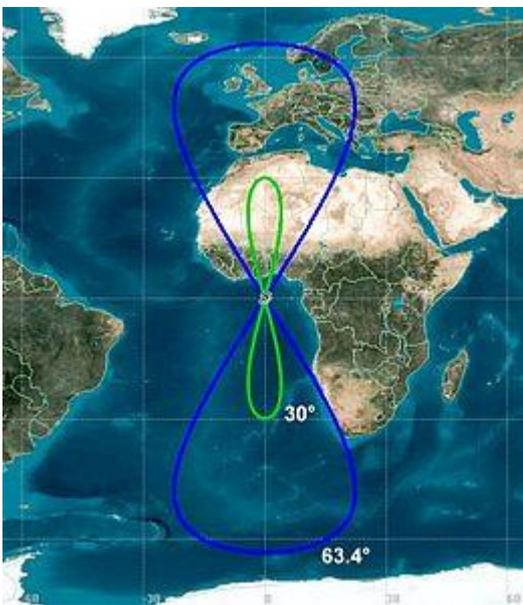
Données en temps réel, carte de positionnement, ... Très intéressant.

Par exemple vous pouvez savoir si l'ISS est en train de passer au-dessus de vos têtes. Si en plus, en fin de journée par beau temps, elle est éclairée par la lumière du Soleil couchant, vous la voyez passer à l'œil nu.

Exercice 5 pour les plus courageux : problème scientifique à propos des satellites géosynchrones

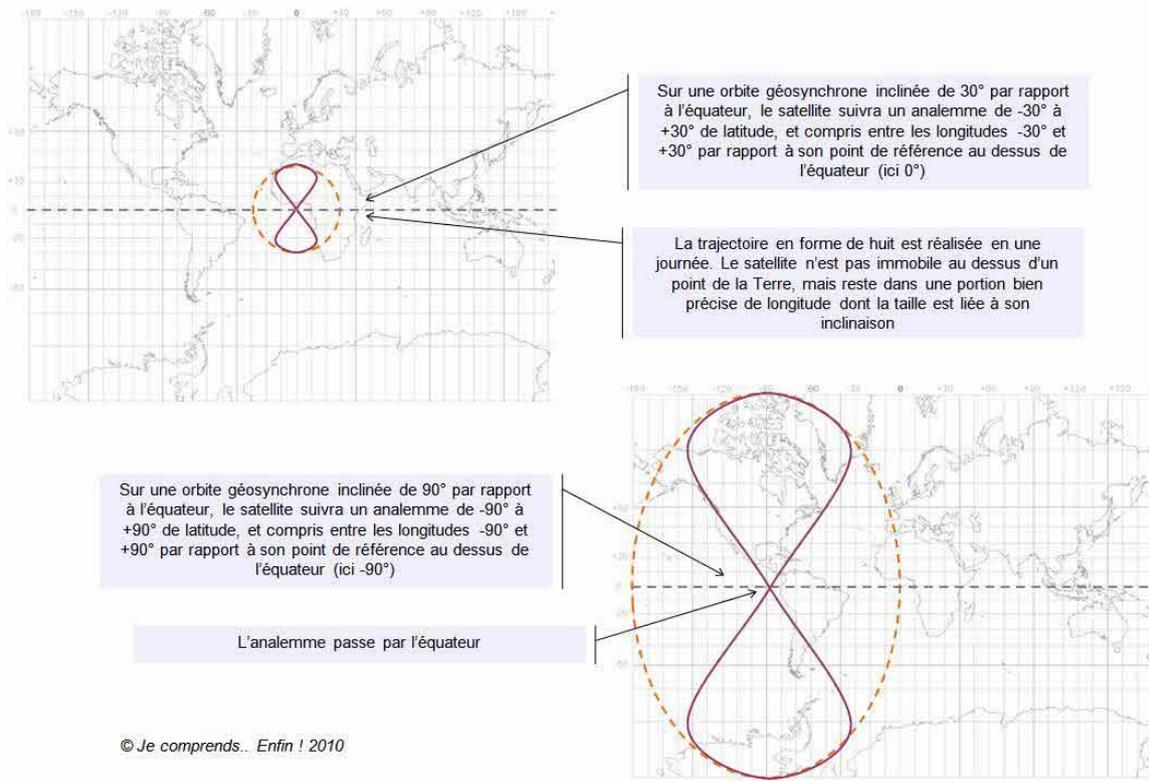
Le document ci-dessous présente la trace au sol de l'orbite d'un satellite terrestre.

A quelle altitude se trouve ce satellite ?



Données page suivante...

Les satellites en orbite géosynchrone ne sont pas fixes depuis un point de la Terre, mais se déplacent sur une figure en forme de huit, appelée analemme. Cette figure est réalisée une fois par jour. Plus l'inclinaison de l'orbite est importante, plus le huit décrit sera haut. Le point central de l'analemme représente le croisement avec le plan de l'équateur terrestre. Le soleil décrit également dans le ciel un analemme si l'on note sa position tout au long de l'année, à la même heure et depuis le même endroit.



Un satellite en orbite géosynchrone décrit un analemme

Un cas particulier des orbites géosynchrones apparaît lorsque ces orbites sont placées dans le plan de l'équateur, c'est-à-dire avec une inclinaison de 0° . Le satellite décrit toujours un analemme dont le sommet et le pied correspondent comme précédemment à l'inclinaison (0°) et le centre au passage de l'équateur (0°). L'analemme est donc réduit à sa plus simple expression, un point. Le satellite est dit géostationnaire car il apparaît toujours fixe dans le ciel depuis la Terre. La visibilité depuis un point d'un satellite géosynchrone est plus complexe car elle va varier au cours de la journée, mais être la même de jour en jour. Contrairement aux satellites en orbite basse, les engins en orbite géostationnaire sont suffisamment loin de la Terre pour couvrir la moitié d'un hémisphère, soit 180° de longitude. Ce n'est pas pour autant que toute cette surface est exploitable, que ce soit en émission ou en réception. La zone réellement utilisable n'est que de 130° , soit de -65° à $+65^\circ$ en latitude et en longitude.

L'**orbite géosynchrone**, abrégée **GSO** (*geosynchronous orbit*), est une orbite géocentrique sur laquelle un satellite se déplace dans le même sens que la planète (d'ouest en est pour la Terre) et dont la période orbitale est égale à la période de rotation sidérale de la Terre (soit environ 23 h 56 min 4,1 s).

Cette orbite peut être inclinée ou non par rapport au plan équatorial et son excentricité peut être nulle (orbite circulaire) ou non (orbite elliptique) :

- Si l'orbite est située dans le plan de l'équateur, le satellite apparaît comme un point fixe dans le ciel. On l'appelle orbite géostationnaire. L'orbite géostationnaire est donc une orbite géosynchrone qui a une inclinaison et une excentricité nulle.
- Si elle est inclinée, la période orbitale correspond toujours à la durée de la révolution de la Terre mais l'orbite s'écarte également au nord et au sud de l'équateur. La trace au sol décrit un analemme dans le ciel lorsqu'il est observé depuis un point fixe de la surface de la Terre. Si l'excentricité est nulle la trace au sol est symétrique par rapport au sol (cf schémas). Certains satellites géostationnaires, toujours actifs mais retirés du service, ont été déplacés sur une orbite géosynchrone inclinée à environ 13° pour permettre aux stations des régions polaires de communiquer.

2) Les oscillateurs mécaniques

a. Caractéristiques d'un système oscillant

Un phénomène mécanique oscillant est caractérisé par le mouvement de va-et-vient d'un objet matériel qui se répète identique à lui-même au cours du temps (périodiquement).

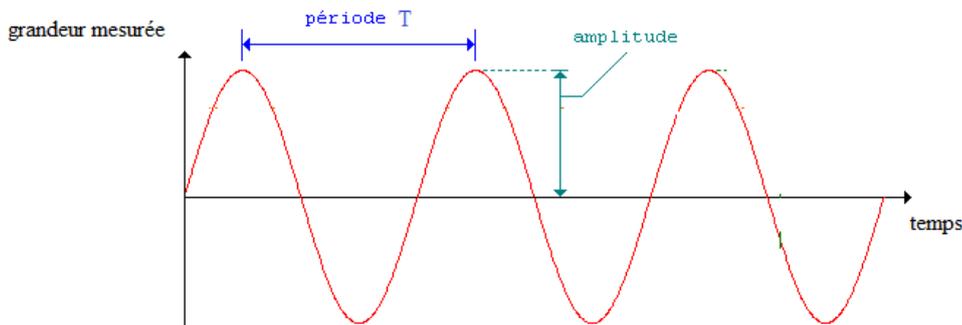
Les grandeurs qui décrivent un système oscillant constituent deux catégories :

- celles qui rendent compte de la répétition du phénomène dans le temps (déjà présentes dans notre étude des mouvements orbitaux) :

la période T : plus petite durée au bout de laquelle le phénomène se répète identique à lui-même, durée d'une oscillation, durée d'un cycle (en seconde s) ;

la fréquence $f = 1/T$ (en Hz dans le S.I.). Elle représente ici le nombre d'oscillations par seconde ;

- celles qui caractérisent le phénomène lui-même (au cours d'une oscillation, d'un cycle du mouvement oscillatoire), coordonnées, trajectoire, etc. Une grandeur caractéristique de tout système oscillant doit toutefois être mise en avant, c'est **l'amplitude**. (*schéma*)



Nous allons étudier deux oscillateurs mécaniques :

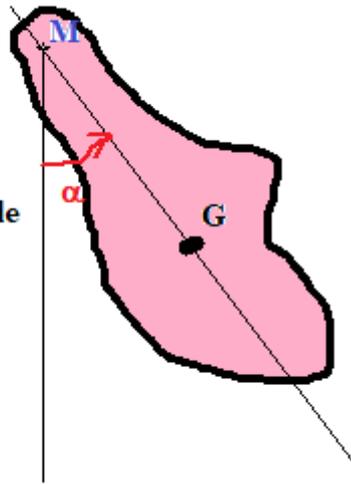
- Le pendule simple
- le système masse ressort

b. Le pendule simple

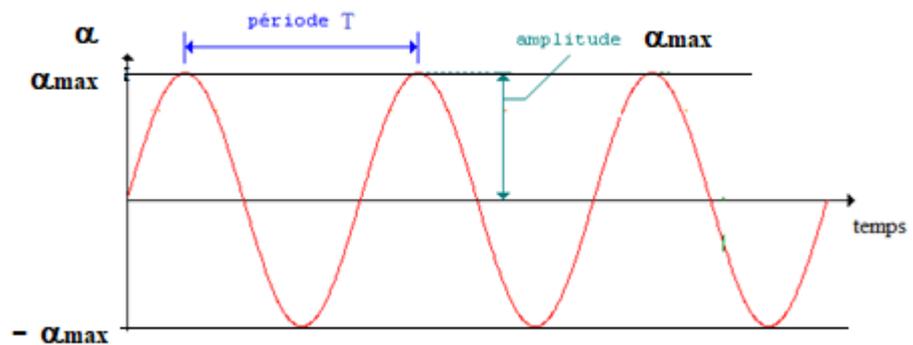
- Présentation

- Pendule pesant : tout système indéformable dont un point différent de G est fixé. Un tel système peut être caractérisé par des oscillations. Les positions peuvent être repérées par l'angle d'inclinaison du pendule par rapport à la verticale.

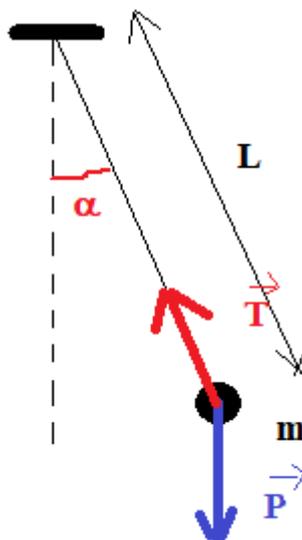
Objet quelconque, accroché en M différent de G. Ecarté de la position verticale d'un angle α puis lâché, l'objet, sous les effets combinés de son poids et de la force qui le retient en M, décrira des oscillations.



- Pendule pesant : description des oscillations en l'absence de frottements, construction du graphe $\alpha=f(t)$, fonction sinusoïdale où sont mises en évidence période et amplitude (on pourra reprendre un fichier vidéo et l'exploiter judicieusement).



- Pendule simple, définition : masse ponctuelle de valeur m accrochée à l'extrémité d'un fil inextensible de longueur L, de masse négligeable et dont l'autre extrémité est fixée.



TP en confinement :

- **Fabriquez vous-même votre pendule simple (ou considéré comme tel) et réalisez chez vous le TP qui suit.**

Dispositif expérimental :

- Du fil très léger (fil à coudre, fil de pêche, ...)
- Un objet rigide qui va servir de potence et posé à bonne hauteur (un balai posé horizontalement sur une table et que l'on fait dépasser, une règle plate (avec trou pour y nouer le fil, ...))
- Un objet suffisamment petit et lourd (gomme, taille crayon, ...) qui joue le rôle de la masse m . Il ne sera pas nécessaire de connaître la valeur de m .
- L'extrémité supérieure du fil est fixée à la potence, l'objet de masse m se balance à l'extrémité inférieure. L'ensemble doit pouvoir être modifié :
 - Longueur du fil
 - Alourdissement de l'objet suspendu.
- La longueur du pendule, entre l'extrémité fixe supérieure du fil et le « centre » de l'objet suspendu, doit pouvoir être mesurée avec précision.

Travail demandé :

- 1) En observant votre pendule simple immobile : justifier que la position verticale observée est la seule position d'équilibre possible dans un référentiel galiléen (on appliquera la première loi de Newton).
- 2) Réalisez un schéma complet de votre pendule simple incliné d'un angle α . On veillera à présenter sur ce schéma les vecteurs caractéristiques des forces exercées.
- 3) Oscillations du pendule
 - a. Une fois le pendule écarté de sa position d'équilibre, abandonner le pendule. Constater son mouvement et valider qu'il est apparemment périodique.
 - b. Comment réaliser une mesure précise de la période T_0 des oscillations ?
 - c. Influence de différents paramètres :
 - i. L'amplitude α_{\max} est la valeur maximum de l'angle d'inclinaison. Si vous abandonnez votre pendule sans vitesse initiale, sans le lancer ou le pousser, α_{\max} est l'angle auquel vous l'avez positionner avant de le lâcher) : Réalisez quelques mesures de période avec différentes valeurs de α_{\max} et validez la proposition suivante : **Tant que α_{\max} n'est pas trop élevée (disons pas plus de 10°) on peut considérer que la période T_0 des oscillations est indépendante de α_{\max} .**
 - ii. Valeur m de la masse accrochée : Même principe, réalisez quelques mesures permettant de valider la proposition : **T_0 est indépendante de m .**
 - iii. Longueur L du pendule (construction de graphe abscisse-ordonnée fortement conseillée) : **T_0 dépend de L .**

Si vous avez la bonne idée de construire un graphe $T_0 = f(L)$ (avec Regressi ? <https://regressi.fr.softonic.com>), vous constatez qu'il traduit bien que lorsque L augmente, T_0 augmente.

Mais ce graphe n'est pas linéaire !

Il ne semble pas évident de modéliser la relation entre T_0 et L avec une expression simple...

Heureusement on vous aide :

Expression de T_0 :
$$T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}} \quad (1) \quad \text{A connaître}$$

Validez cette relation à l'aide de vos résultats expérimentaux :

Tracez quelque chose de plus judicieux, qui devrait donner une droite passant par l'origine et dont vous vérifieriez la valeur du coefficient directeur :

- Soit vous tracez $T_0 = f(\sqrt{L})$ et vous devriez obtenir une droite passant par l'origine et de coefficient directeur $\frac{2\pi}{\sqrt{g}}$.
- Soit vous tracez $T_0^2 = f(L)$ et vous devriez obtenir une droite passant par l'origine et de coefficient directeur $\frac{4\pi^2}{g}$.

4) Application : Maintenant que la relation (1) est validée, mesurer une hauteur plus importante à l'aide d'un pendule simple suffisamment long (hauteur de plafond, hauteur depuis la fenêtre de votre chambre, etc... Ne tombez pas par la fenêtre...).

5) Réalisez une analyse dimensionnelle de l'expression $2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$ et vérifiez qu'elle représente bien des secondes. **A MAITRISER**

6) Supplément : Si vous avez un réglet métallique percé d'un trou sur une de ses extrémités, vous pouvez le glisser dans un clou (ou une allumette, ou n'importe quoi...) maintenu horizontal et le faire osciller.

- Déterminer la période des oscillations.
- A quel pendule simple (de quelle longueur) correspond le pendule « réglet » ?
- Pourquoi ce résultat n'est-il pas surprenant ?

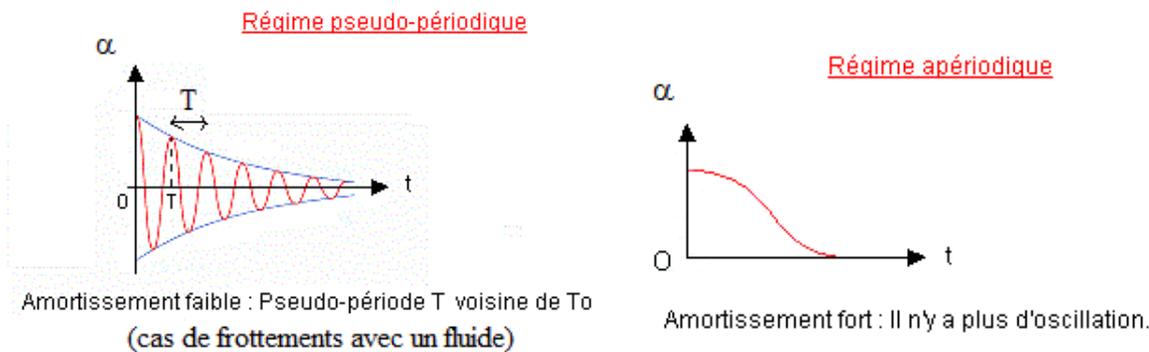
- **Pendule simple, aspect énergétique : déjà correctement traité lors de la séance « énergies mécaniques » (septembre 2019)**

La vidéo que vous aviez exploitée est toutefois à votre disposition...

Supplément lecture: en présence de frottements

Le pendule est maintenant abandonné sans vitesse initiale, depuis une position α_{\max} . Les frottements ne sont plus négligeables mais restent toutefois assez faibles. Un régime d'oscillations amorties est observé. On ne peut plus qualifier le mouvement de périodique (puisque l'amplitude diminue à chaque oscillation). Il est dit pseudo-périodique et la pseudo-période T peut être considérée comme valant T_0 .

Si les frottements augmentent, le retour à la position d'équilibre peut se faire selon un régime dit apériodique (la limite entre les deux régimes, souvent recherchée, est dite apériodique critique, c'est-à-dire retour rapide à l'équilibre sans oscillations) :



c. Le système masse-ressort

Nous envisageons l'étude expérimentale du mouvement périodique d'une masse suspendue à un ressort vertical en mesurant la période T des oscillations.

Cette étude sera précédée d'une description théorique qui sera proposée sur un système {masse-ressort} horizontal évoluant en l'absence de tous frottements.

Il faudra donc, pour gagner du temps, accepter que le fait de disposer le ressort verticalement ne change rien aux résultats caractérisant ses oscillations (Nous serons en mesure de le démontrer si le temps le permet).

Quelques données théoriques sur les ressorts

- **Force élastique (de rappel) : à connaître**

Lorsque l'on maintient un ressort allongé ou comprimé par rapport à sa longueur dite au repos, il exerce sur l'opérateur une force appelée tension et caractérisée par le vecteur :

$$\vec{F} = -k\overline{A_0A}$$

Si une extrémité du ressort est accrochée à un point fixe, A_0 est la position de l'autre extrémité au repos et A sa position après allongement ou compression du ressort.

On peut utiliser un vecteur unitaire \vec{i} de même direction que celle définie par le ressort et de sens correspondant à l'allongement du ressort. L'expression de \vec{F} devient alors :

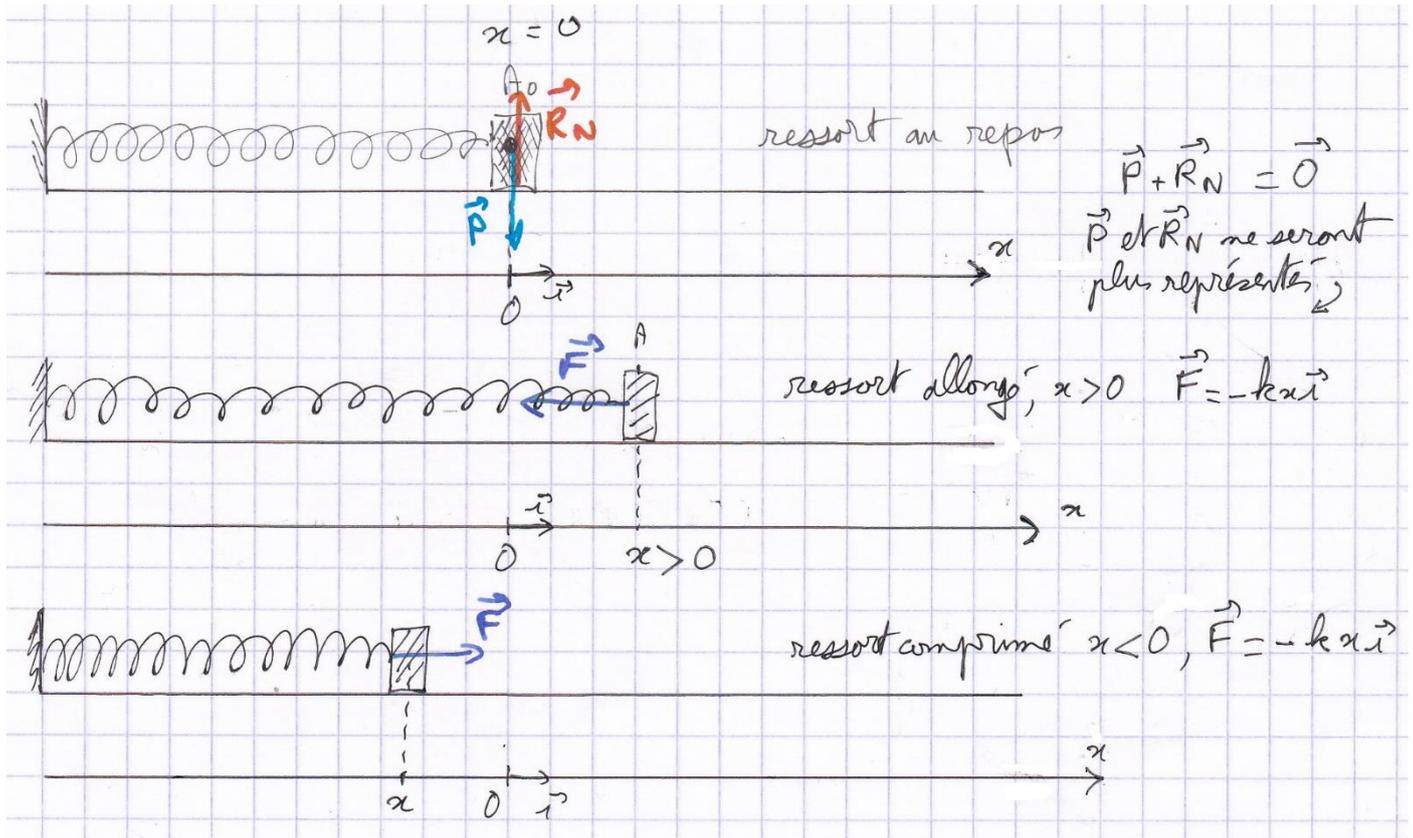
$$\vec{F} = -kx\vec{i} \quad (1)$$

avec $x = \overline{A_0A}$, allongement ou élongation du ressort (positif si le ressort est allongé, négatif s'il est comprimé).

k est appelée (constante de) raideur du ressort (unité : $\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$)

- **Description théorique des oscillations (système masse-ressort évoluant horizontalement sans frottement) :**

Schéma :



Appliquons la deuxième loi de Newton à cette situation.

Avant de commencer, nous allons simplifier notre travail à venir :

- D'abord, ayant conscience que \vec{P} et \vec{R}_N s'annulent, nous ne considérerons que la force \vec{F} .
- Ensuite, nous avons bien conscience que le mouvement d'oscillations va se faire horizontalement, toutes les coordonnées verticales (accélération, vitesse, position) vont rester nulles.

La deuxième loi de Newton $\sum \vec{F}_{ext} = m\vec{a}_G$ devient $\vec{F} = m\vec{a}_G$

Si nous la projetons sur l'axe Ox (si nous la reprenons avec les coordonnées selon l'axe Ox), elle donne :

$$F_x = ma_x$$

Soit :

$$-kx = m \frac{d^2x}{dt^2}$$

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -\frac{k}{m} x \quad (2)$$

L'équation (2) ci-dessus est une **équation différentielle**, c'est-à-dire une équation mettent en relation une fonction et une (ou plusieurs) dérivée(s) de cette fonction.

Ici, c'est comme si nous avions écrit : $f''(t) = -\frac{k}{m} f(t)$

Il n'est pas question pour nous de résoudre cette équation. Nous allons juste proposer un exemple de solution, une fonction sinusoïdale du temps qui nous nous semblera acceptable (du fait de son caractère périodique et alternatif) et nous allons vérifier qu'elle est bien solution de l'équation (2) ci-dessus.

Pour avancer dans cette vérification, il faut maîtriser les dérivations de fonctions sinusoïdales :

$$(\sin x)' = \cos x \quad (\sin u)' = u' \cos u \quad (\cos x)' = -\sin x \quad (\cos u)' = -u' \sin u$$

Solution proposée : $x(t) = x_{\max} \cos\left(\frac{2\pi t}{T} + \varphi\right)$ avec :

- x_{\max} est l'amplitude des oscillations.
- T est la période
- φ est la « phase » à l'origine des temps, sa valeur indique la position x à $t = 0$ s

Comme nous cherchons à mettre en relation $x(t)$ et sa dérivée seconde par rapport au temps $\frac{d^2x}{dt^2}(t)$, nous allons dériver deux fois la fonction $x(t) = x_{\max} \cos\left(\frac{2\pi t}{T} + \varphi\right)$:

$$\frac{dx}{dt} = -\frac{2\pi}{T} x_{\max} \sin\left(\frac{2\pi t}{T} + \varphi\right)$$

Nous dérivons à nouveau pour obtenir :

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -\left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 x_{\max} \cos\left(\frac{2\pi t}{T} + \varphi\right) = -\left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 x(t) ! \text{ Nous avons retrouvé l'équation différentielle (2)...}$$

... A condition de procéder à une identification :

$$(2) : \frac{d^2x}{dt^2} = -\frac{k}{m} x \quad \text{et ici :} \quad \frac{d^2x}{dt^2} = -\left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 x$$

$$\text{Donc } \frac{k}{m} = \frac{2\pi}{T} \quad (3)$$

Cela nous permet à la fois de valider la solution proposée (elle aurait pu être sous la forme d'un sinus au lieu d'un cosinus, cela ne changeait rien) mais aussi de pousser jusqu'à exprimer la période des oscillations (que nous notons finalement T_0). En effet, l'expression (3) peut mener à :

$$T = T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} \quad (4)$$

Exercice :

- Réaliser une analyse dimensionnelle de l'expression de T_0 ci-dessus et valider qu'elle correspond bien à une durée (valider que l'unité de $\sqrt{\frac{m}{k}}$ est bien la seconde). **A MAITRISER**

- Dans l'expression $x(t) = x_{\max} \cos\left(\frac{2\pi t}{T} + \varphi\right)$, montrer que T représente bien la période.

(On rappelle que, mathématiquement, la fonction $\cos x$ reprend les mêmes valeurs chaque fois que l'on rajoute 2π à x , autrement dit : $\cos(x) = \cos(x+2\pi)$ quel que soit x)

Remarque : dans certains exercices l'expression $\frac{2\pi}{T_0}$ est remplacée par un symbole unique noté ω_0 et appelé pulsation.

Question : proposer une unité pour ω_0

- **TP de validation**

Pas facile en confinement si l'on n'est pas en possession d'un ressort suffisamment souple et suffisamment long...

Etude expérimentale des oscillations

- Préliminaire : en manipulant le système {masse-ressort} au repos, vérifier la relation (1) et déterminez le plus précisément possible sa constante de raideur (vous présenterez par écrit la méthode choisie).
 - Aide et guidage : Le système étant positionné au repos et restant immobile dans un référentiel considéré comme galiléen, on peut considérer qu'il vérifie la 1^{ère} loi de Newton, c'est-à-dire que les deux forces s'exerçant sur la masse, son poids et la force de rappel, s'annulent. Le tracé d'un graphe dont l'exploitation (détermination du coefficient directeur d'une droite) mènera à la valeur de k est attendu.
 - Aide 2020, confinement oblige :

$$\vec{F} + \vec{P} = \vec{0}$$

$$\vec{F} = -\vec{P}$$

Ces deux forces on donc la même valeur : $P = F$
 $mg = k|x|$

Si nous traçons $mg = f(x)$, nous obtiendrons une droite de coefficient directeur k.
Une valeur courante de k au cours des séances de TP est $k = 20 \text{ N.m}^{-1}$.

- **Faire osciller le ressort et mesurer le plus précisément possible la période des oscillations pour différentes valeurs de m, la masse suspendue (c'est-à-dire que l'on mesure un intervalle de temps de 10 périodes et on obtient, en le divisant par 10, la valeur de T avec plus de précision).**

- Vérifier l'exactitude de l'expression : $T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$ (4)

- Aide et guidage : on veillera à tracer un graphe avec **l'objectif d'obtenir une droite** passant par l'origine. La validation du caractère rectiligne du graphe et la détermination du coefficient directeur correspondant permettront de valider la formule.
- Solution :
k étant connue, nous pouvons tracer $T_0 = f(\sqrt{m})$. Nous devrions obtenir une droite passant par l'origine de coefficient directeur $\frac{2\pi}{\sqrt{k}}$.

(Nous aurions pu tracer $T^2 = f(m)$ et obtenir une droite passant par l'origine et de coefficient directeur $\frac{4\pi^2}{k}$)

- **Remarque sur le fait de travailler verticalement alors que la description théorique utilisait un dispositif horizontal :**

ressort à vide $x=0$

ressort immobile avec m accroché

(cas du ressort plus allongé : ressort entraîné d'osciller avec $x \neq x_0$)

$mg = k x_0$
 $(\vec{p} + \vec{F} = \vec{0})$
 $mg\vec{i} - k x_0\vec{i} = \vec{0}$

$m\vec{a} - k x\vec{i} = m\vec{a}$
 $k x_0\vec{i} - k x\vec{i} = m\vec{a}$
 $-k(x - x_0)\vec{i} = m\vec{a}$

allongement par rapport à la position 2... à partir de là, même raisonnement qu'à l'horizontale...

$\vec{F} + \vec{p}$ est ici (dans ce cas) un vecteur vertical et vers le haut, l'accélération l'est aussi

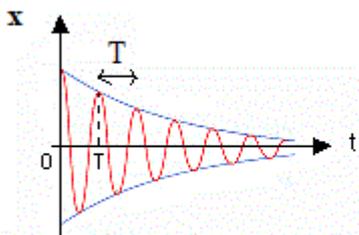
- **Remarque sur l'évolution d'un système masse-ressort en présence de frottements**

Même description que pour le pendule pesant (lecture) :

La masse située à l'extrémité du ressort est maintenant abandonnée sans vitesse initiale, depuis une position x_{max} . Les frottements ne sont plus négligeables mais restent toutefois assez faibles. Un régime d'oscillations amorties est observé. On ne peut plus qualifier le mouvement de périodique (puisque l'amplitude diminue à chaque oscillation). Il est dit pseudo-périodique et la pseudo-période T peut être considérée comme valant T_0 .

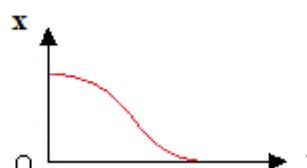
Si les frottements augmentent, le retour à la position d'équilibre peut se faire selon un régime dit apériodique (la limite entre les deux régimes, souvent recherchée, est dite apériodique critique, c'est-à-dire retour rapide à l'équilibre sans oscillations) :

Régime pseudo-périodique



Amortissement faible : Pseudo-période T voisine de T_0
(cas de frottements avec un fluide)

Régime apériodique



Amortissement fort : Il n'y a plus d'oscillation.

Aspect énergétique

- *Energie potentielle élastique :*

Lorsqu'un ressort est allongé ou comprimé d'une valeur x par rapport à sa longueur au repos, il possède une énergie potentielle élastique :

$$E_{pe} = \frac{1}{2} k x^2$$

Cette expression n'est pour l'instant pas démontrée, mais les plus courageux d'entre vous pourront s'y essayer lorsque la notion d'intégrale aura été vue en cours de mathématiques.

Il est demandé de retenir cette expression car, comme nous l'avons fait en début d'année scolaire dans le cadre de l'étude de mouvements d'objets en chute libre, nous pouvons ici aussi résoudre des problèmes avec le point de vue énergétique.

En effet, comme la force de rappel d'un ressort (ou de tout système dit « élastique ») est une force conservative, c'est une force qui n'occasionne aucune variation d'énergie mécanique du système.

Son effet est une répartition variable de l'énergie en énergie cinétique et énergie potentielle élastique.

Autrement dit et en considérant un cas simple, un système évoluant sous l'action de la force élastique précédemment définie \vec{F} va évoluer entre deux points A et B à énergie mécanique constante :

$$E_{mA} = E_{mB}$$
$$E_{cA} + E_{peA} = E_{cB} + E_{peB}$$

- « pe » en indice : « potentielle élastique »
- L'adjectif « élastique » désigne un système qui, une fois déformé, reviendra spontanément à sa forme initiale (au contraire, on dit d'un système qui, après déformation, reste déformé, qu'il a subi une déformation « plastique »)

Si vous avez téléchargé Regressi, vous pouvez exploiter le fichier vidéo « chapitre 9 film ressort » :

- On prendra $k = 20 \text{ N.m}^{-1}$, $x_m = 3 \text{ cm (0,03 m)}$ et $m = 50 \text{ g (0,05 kg)}$

- Pas facile de choisir une origine... Il faut essayer qu'elle corresponde à la position du système lorsqu'il est au repos (il faut chercher le « zéro » des oscillations en visionnant le film...)

- En négligeant les frottements ainsi que la masse du ressort, en considérant la masse accrochée comme ponctuelle, exprimer l'énergie mécanique totale du système en mouvement (on n'omettra pas de considérer l'énergie potentielle de pesanteur, mais comme le système évolue horizontalement, on pourra considérer qu'il se trouve à l'ordonnée $z = 0$ et que $E_{pp} = 0 \text{ J}$ en permanence).

- Construire la courbe $E_{pe} = f(x)$ entre $-x_m$ et x_m : créer la grandeur $E_p = 0.5*20*x^2$ et tracer $E_p=f(x)$
- Tracer sur le même graphe la courbe $E_c = f(x)$ entre $-x_m$ et x_m : créer la grandeur $E_c = 0,5*0.05*v^2$ et tracer $E_c = f(x)$ (la vitesse v a été préalablement créée)
- Créer la grandeur $E_m = E_c + E_p$, tracer $E_m = f(x)$ et valider le caractère conservatif de la force élastique.
- Quand le ressort, allongé de x_m , est lâché sans vitesse, quelle est sa vitesse quand il passe par la position A_0 ($x = 0$) ?

Suppléments (facultatifs) :

- Expliquer pourquoi l'énergie potentielle de pesanteur n'influence pas le mouvement de la masse, même dans le cas du système masse-ressort vertical.
- Intégrer le travail de la force élastique afin d'établir l'expression de E_p élastique.
- Présenter sur un diagramme les échanges d'énergie E_p/E_c dans le cas d'un régime d'oscillations libres pseudo périodiques amorties.

d) Conclusions (valables autant pour le pendule pesant que pour le système masse-ressort)

Un oscillateur libre non amorti évolue :

- à énergie mécanique constante : $E_m = E_c + E_p = \text{cste}$
- à amplitude constante.

Au cours des oscillations, il y a perpétuellement transformation d' E_c en E_p et vice-versa.

Quand l'élongation est maximale (amplitude atteinte), $E_c = 0$ et E_p est maximum.

Quand on passe par l'élongation zéro (position d'équilibre), E_c est maximum et E_p est nulle (ou minimum suivant le choix de l'origine des E_p).

Question finale : en l'absence de frottements, un oscillateur peut constituer un outil de mesure du temps, pourquoi ?

3) Mesure du temps : à l'aide de phénomènes périodiques bien choisis

Document 1, le cours de physique de Feynman (1963) :

En V.O. :

“We have implied that it is convenient if we start with some standard unit of time, say a day or a second, and refer all other times to some multiple or fraction of this unit. What shall we take as our basic standard of time? Shall we take the human pulse? If we compare pulses, we find that they seem to vary a lot. On comparing two clocks, one finds they do not vary so much. You might then say, well, let us take a clock. But whose clock? .../... It is rather difficult to decide whose clock we should take as a standard. Fortunately, we all share one clock—the earth. For a long time the rotational period of the earth has been taken as the basic standard of time. As measurements have been made more and more precise, however, it has been found that the rotation of the earth is not exactly periodic, when measured in terms of the best clocks. These "best" clocks are those which we have reason to believe are accurate because they agree with each other. We now believe that, for various reasons, some days are longer than others, some days are shorter, and on the average the period of the earth becomes a little longer as the centuries pass.

Until very recently we had found nothing much better than the earth's period, so all clocks have been related to the length of the day, and the second has been defined as 1/86400 of an average day. Recently we have been gaining experience with some natural oscillators which we now believe would provide a more constant time reference than the earth, and which are also based on a natural phenomenon available to everyone. These are the so-called "atomic clocks." Their basic internal period is that of an atomic vibration which is very insensitive to the temperature or any other external effects. These clocks keep time to an accuracy of one part in 10⁹ or better. .../... We may expect that since it has been possible to build clocks much more accurate than astronomical time, there will soon be an agreement among scientists to define the unit of time in terms of one of the atomic clock standards.”

En V.F. :

« Nous avons dit qu'il est commode de commencer avec une certaine unité étalon de temps, par exemple un jour ou une seconde, et de rapporter les autres temps à certains multiples ou certaines fractions de cette unité. Que devons-nous prendre comme notre étalon de base de temps ? Devons-nous choisir le pouls humain ? Si nous comparons les pouls entre eux, nous trouvons qu'ils semblent beaucoup varier. En comparant deux horloges, on trouve qu'elles ne varient pas autant. Vous pouvez alors dire : « Bien, choisissons une horloge. » Mais l'horloge de qui ?.../... Il est assez difficile de décider de qui nous choisirons la pendule pour en faire un étalon. Heureusement nous disposons tous d'une même horloge – la Terre. Pendant longtemps, la période de rotation de la Terre a été choisie comme l'étalon de base du temps. Lorsque les mesures ont été rendues de plus en plus précises, on a trouvé cependant que la rotation de la Terre n'est pas exactement périodique, lorsqu'elle est mesurée avec les meilleurs horloges. Ces « meilleures » horloges sont en accord entre elles. Nous pensons maintenant que, pour diverses raisons, certains jours sont plus longs que d'autres, certains jours plus courts, et qu'en moyenne la période de la Terre augmente un peu au cours des siècles.

Jusqu'à très récemment, nous n'avions rien trouvé de mieux que la période de la Terre, ainsi toutes les horloges se référaient à la longueur du jour, et la seconde avait été définie comme 1/86400 d'un jour moyen. Récemment, nous avons acquis de l'expérience avec certains oscillateurs naturels dont nous pensons maintenant qu'ils fourniront une référence de temps plus constante que la Terre, et qu'ils sont également basés sur des phénomènes naturels accessibles à tout le monde. Ce sont ce que l'on appelle les « horloges atomiques ». Leur période interne de base est celle d'une vibration atomique qui est très peu sensible à la température ou à tout autre effet externe. Ces horloges conservent leur régularité à une part pour 10⁹ ou mieux.../... Puisqu'il est possible de construire des horloges beaucoup plus précises que le temps astronomique, nous pouvons bientôt nous attendre à un accord entre les scientifiques, pour définir l'unité de temps en termes de l'un des étalons d'horloge atomique.

Document 2 : Définitions de la seconde

La définition de la seconde, l'unité SI de temps, a été établie selon les connaissances et les possibilités techniques de chaque époque.

Elle a d'abord été définie comme la fraction 1/86400 du jour solaire terrestre moyen. L'échelle de temps associée est le temps universel TU. Cette durée est proche de la période moyenne du battement du cœur d'un homme adulte au repos.

En 1956, pour tenir compte des imperfections de la rotation de la Terre qui ralentit notamment à cause des marées, elle a été basée sur la révolution de la Terre autour du Soleil et définie comme la fraction 1/31 556 925,9747 de l'année tropique 1900. C'est la seconde du temps des éphémérides TE.

Depuis la 13^e Conférence générale des poids et mesures, la seconde n'est plus définie par rapport à l'année, mais par rapport à une propriété de la matière ; cette unité de base du système international a été définie en 1967 dans les termes suivants :

La seconde est la durée de 9 192 631 770 périodes de la radiation correspondant à la transition entre les niveaux hyperfins F=3 et F=4 de l'état fondamental $^6S_{1/2}$ de l'atome de césium 133 (définition datant de 1967)

La seconde, étalon de mesure du temps, est ainsi un multiple de la période de l'onde émise par un atome de césium 133 lorsqu'un de ses électrons change de niveau d'énergie. On est ainsi passé de définitions, en quelque sorte descendantes, dans lesquelles la seconde résultait de la division d'un intervalle de durée connue en plus petits intervalles, à une définition ascendante où la seconde est multiple d'un intervalle plus petit.

Remarque : cette définition se réfère à un atome de césium au repos, à une température de 0 K. Cette dernière précision souligne le fait qu'à 300 K, la transition en question subit, par rapport à sa valeur théorique, un déplacement en fréquence dû aux effets de rayonnement. D'où une définition plus élargie du temps qui passe, prenant en compte les mesures réalisées par différents laboratoires.

Le Temps Atomique International TAI est la coordonnée de repérage temporel établie par le Bureau International de l'Heure (remplacé maintenant par le Bureau International des Poids et Mesures) sur la base des indications d'horloges atomiques fonctionnant dans divers établissements conformément à la définition de la seconde, unité de temps du Système International d'unités.

On dispose aujourd'hui d'une exactitude allant jusqu'à la 14e décimale (10^{-14}). L'exactitude et la stabilité de l'échelle du TAI obtenue principalement à partir d'horloges atomiques à jet de césium sont environ 100 000 fois supérieures à celles du temps des éphémérides. C'est d'ailleurs l'unité du SI la plus précisément connue.

De nombreuses expériences en cours sur des transitions atomiques à des fréquences optiques, beaucoup plus élevées que les 9 GHz de la définition actuelle de la seconde, indiquent clairement que les performances obtenues avec l'atome de césium sont ou seront dépassées de plusieurs ordres de grandeur dans un avenir proche. Il faut s'attendre à ce qu'une nouvelle définition de la seconde voie le jour dans la décennie 2010-2020, dès que le meilleur des différents atomes candidats (calcium, ytterbium, strontium, mercure...) aura été désigné par l'expérience. Elle sera toujours liée à une transition atomique. Cette nouvelle définition coïncidera peut-être avec l'abandon des secondes intercalaires et donc avec une définition de l'échelle de temps internationale de référence purement atomique indépendante de la rotation terrestre, donc de l'astronomie. **Questions**

- 1) Etablir le lien entre la valeur 86400 évoquée dans le document 1 et diverses unités de temps (seconde, minute, heure et jour)
- 2) Etablir le lien avec la fréquence 9 GHz et le nombre de périodes (9192631770) permettant de définir la seconde (document 2)
- 3) Quelle est la différence d'énergie (en joules) entre les deux niveaux hyperfins présentés dans le document 2 ?
- 4) La valeur trouvée précédemment est-elle du même ordre de grandeur que celles que l'on mesure entre deux niveaux d'énergie électroniques traditionnels, qui sont de quelques eV ($1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$) ? Commentez le résultat de la comparaison effectuée.

5) Synthèse : pourquoi un phénomène atomique (transition entre deux niveaux d'énergie) est-il plus fiable qu'un phénomène astronomique (rotation de la Terre) pour mener à une définition de l'unité de temps (la seconde) ?

II – (Les temps modernes) Espace-temps

Le temps est une coordonnée comme une autre : attention au référentiel de mesure !!

1) Postulats d'Einstein

a) Principe de relativité

Toutes les lois physiques sont invariantes par changement de référentiel galiléen.

Considérons un phénomène physique simple : la chute d'un caillou lâché d'une fenêtre du lycée. La nature du mouvement du caillou est régie par les forces s'exerçant sur le caillou et se trouve être indépendante du référentiel (galiléen) dans lequel le mouvement est étudié.

Le choix du référentiel peut mener à des équations du mouvement qui peuvent changer :

- Dans le référentiel terrestre elles permettront d'établir que la trajectoire est rectiligne ;
- Si le référentiel est une voiture circulant en mouvement rectiligne uniforme dans la cours, la trajectoire de chute du caillou sera parabolique.

Mais la loi physique ne changera pas. La loi physique ici est : le caillou chute en accélérant, son accélération étant à peu près égale à \vec{g} , le champ de pesanteur terrestre dans la zone de chute.

Si l'on bascule dans un référentiel non galiléen, par exemple le référentiel caillou (en train de tomber en accélérant), la loi physique change (dans ce référentiel, le caillou, bien que toujours soumis à son poids \vec{P} , reste immobile.

Donc ce qui est invariant, qui ne dépend pas du référentiel, c'est la loi physique (la description d'une accélération causée par l'interaction gravitationnelle entre la Terre et le caillou)...

... Ce qui change, ce qui dépend du référentiel (ce qui est relatif au référentiel choisi), ce sont les coordonnées des grandeurs.

b) Cas particulier : « invariance de la vitesse de la lumière »

(plutôt : invariance de c, la valeur de la célérité des ondes lumineuses dans le vide)

La valeur de c est connue : $3,00 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$ ($2,99792458 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$)

Ce qu'apporte Einstein à cette grandeur c'est son caractère de loi physique, la valeur de c est une loi physique, elle est donc invariante par changement de référentiel galiléen, (absolument indépendante du référentiel dans lequel on la mesure).

Afin de bien cerner l'aspect exceptionnel de ce postulat, considérons d'abord un exemple classique : Nous roulons dans une voiture n°1 à 60 km.h^{-1} dans le référentiel terrestre (par rapport à la route). Une voiture n°2 vient vers nous (en sens opposé, donc) à la même vitesse dans le référentiel terrestre. Si maintenant nous étudions le mouvement de la voiture n°2 dans le référentiel voiture n°1, nous établirons en particulier qu'elle possède une vitesse de 120 km.h^{-1} .

Un autre exemple : je suis immobile dans un train se déplaçant en mouvement rectiligne uniforme à 200 km.h^{-1} . Dans le référentiel train, galiléen, ma vitesse est nulle. Dans le référentiel terrestre, galiléen, ma vitesse vaut 200 km.h^{-1} .

Revenons à la valeur de c :

Supposons un dispositif permettant la mesure de c célérité de la lumière provenant du Soleil.

- Ce dispositif est d'abord installé sur Terre et la mesure est réalisée dans le référentiel Terrestre.
- Le lendemain, le dispositif est installé dans une fusée se dirigeant tout droit et à grande vitesse vers le Soleil. La mesure est réalisée dans le référentiel fusée.
- Le surlendemain, même principe que la veille, mais la fusée s'éloigne à grande vitesse du Soleil.

Pour les trois mesures, réalisées dans trois référentiels galiléens, le référentiel terrestre, le référentiel fusée 1, le référentiel fusée 2, la valeur de c trouvée est exactement la même !

Une telle expérience, qui semble imaginée, a été réalisée (sans fusée !) pour la première fois en 1887 par Michelson et Morley (voir activité livre p 260). Elle a depuis été améliorée avec des résultats confirmant toujours le postulat :

invariance de c dans tout référentiel galiléen

Les conséquences de cette invariance sont immenses.

Nous nous intéresserons essentiellement à celles concernant la mesure du temps puisque c'est le thème principal de notre chapitre.

2) Durée entre deux événements

a) Événement, définition

Un événement est un ensemble de 4 coordonnées (x, y, z, t) dans un référentiel donné, autrement dit une position associée à une date dans ce référentiel.

En disant : « maintenant, ce train passe devant moi » et ayant choisi de considérer un point précis du train, je désigne effectivement un événement. Il y a bien une position (« devant moi ») et une date (« maintenant »).

b) Discussions

Premier exemple : la lanterne allumée en haut du mât d'un bateau...

(Cet exemple est aussi décrit dans votre livre p 264, avec schéma associé...)

Un marin allume une lanterne au sommet du mat d'un navire, il s'agit de mesurer la durée mise par la lumière pour arriver au pied du mât, se refléter sur un miroir, puis revenir sur le marin, en adoptant deux points de vue : celui d'un observateur situé dans le bateau et celui d'un autre situé sur la berge voyant le bateau passer devant lui à la vitesse v.

Nous mesurons en fait la durée entre deux événements :

- Événement 1 : émission de lumière depuis la main du marin (point A).
- Événement intermédiaire : réflexion de la lumière sur le miroir au pied du mat (point B).
- Événement 2 : retour de la lumière dans la main du marin (point A)

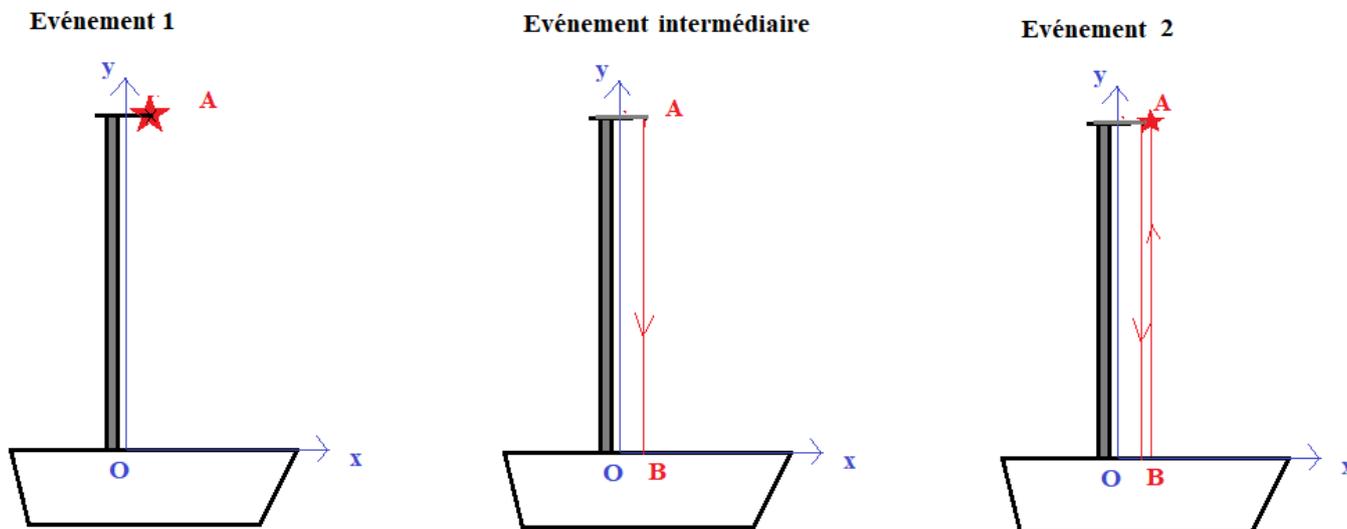
Nous notons que dans le référentiel bateau (ou marin), les événements 1 et 2 ont lieu au même point.

L'aller-retour de la lumière va être décrit dans 2 référentiels : le référentiel bateau (ou marin sur le mat, si vous préférez), puis le référentiel terrestre (ou référentiel berge, si vous préférez).

A chaque fois on utilise un repère Ox,Oy lié au référentiel. On note bien que le repère n'est donc pas le même lors de chaque description.

La hauteur du mat est notée d.

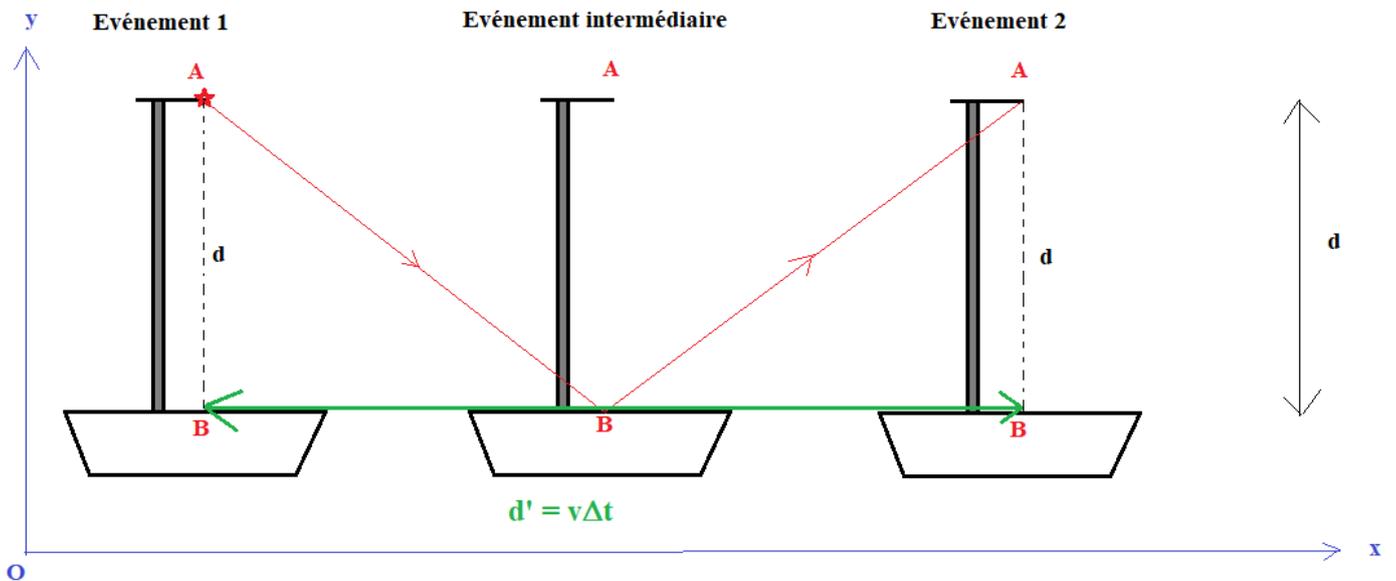
Dans le référentiel lié au bateau (schéma ci-dessous) :



La durée Δt_0 mise par la lumière pour parcourir l'aller-retour le long du mat dans le référentiel du bateau apparaît dans la relation : $2d = c\Delta t_0$

(c est la valeur de la célérité de la lumière dans le vide)

Dans le référentiel lié à la berge (le référentiel terrestre) (voir schéma 2) :



On note Δt la durée mise par la lumière réaliser l'aller-retour haut-bas-haut du mat dans le référentiel de la berge. Le calcul s'appuie sur la figure ci-dessous et utilise explicitement le fait que **la vitesse de la lumière est aussi égale à c dans le référentiel de la berge**. En notant v la vitesse du bateau par rapport à la berge et en utilisant le théorème de Pythagore on établit que :

$$\left(\frac{c\Delta t}{2}\right)^2 = \left(\frac{v\Delta t}{2}\right)^2 + d^2$$

et, comme $2d = c\Delta t_0$, (voir description dans le référentiel bateau) il vient :

$$\left(\frac{c\Delta t}{2}\right)^2 = \left(\frac{v\Delta t}{2}\right)^2 + \left(\frac{c\Delta t_0}{2}\right)^2$$

Nous avons donc :

$$\Delta t = \gamma \Delta t_0 \text{ avec } \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Comme γ est toujours plus grand que 1, on a pris l'habitude de dire : « Il y a dilatation des durées lorsque l'on passe de la mesure dans le référentiel propre (ici, le bateau) à une autre référentiel (ici, la berge) ».

Vous réalisez une mesure de durée entre deux événements, vous déclenchez puis vous arrêtez le chronomètre... La valeur lue n'est plus absolue, elle dépend du référentiel choisi.

Il n'y a finalement plus de différence la coordonnée temps et les coordonnées spatiales, toutes dépendent du référentiel choisi.

Nous notons que (et ce sera toujours le cas) la durée la plus faible correspond toujours à la valeur déterminée dans le référentiel dans lequel les deux événements ont lieu au même point (les coordonnées spatiales des deux événements sont identiques dans ce référentiel).

Deuxième exemple : Comment les muons peuvent-ils traverser l'atmosphère et être détectés à la surface terrestre ? (exercice)

Le muon est une particule qui porte la même charge électrique que l'électron, mais avec une masse 207 fois plus grande, c'est pourquoi on l'appelle aussi électron lourd.

Les muons sont produits par l'interaction entre les rayons cosmiques émis par le Soleil et la haute atmosphère de la Terre, à une altitude d'environ 10 km.

*Un muon **au repos** se désintègre en moyenne au bout d'une durée de valeur $\tau = 2,2 \mu\text{s}$. Les muons émis dans la haute atmosphère le sont avec une vitesse égale à 99,8 % de la célérité de la lumière dans le vide. On peut considérer cette vitesse comme constante.*

*On considère souvent que le fait de pouvoir détecter des muons à la surface de la Terre est une preuve expérimentale de la dilatation des durées. **Expliquer cette affirmation***

Aide

- Sans trop réfléchir, calculer la distance parcourue par un muon pendant $2,2 \mu\text{s}$.
- Quelle est la durée de vie moyenne d'un muon observé depuis un point fixe de la surface terrestre (dans le référentiel terrestre, donc) ?
- Quelle est la distance que peut parcourir le muon dans le référentiel terrestre ?
- Le muon peut-il être détecté à la surface de la Terre ?

Nous appellerons donc durée propre la durée mesurée entre deux événements dans le référentiel dans lequel les deux événements se produisent au même endroit (en un même point de l'espace). Le référentiel est alors appelé référentiel propre.

c) Conclusions

Donc :

La notion d'événement nous apparaît maintenant vraiment cohérente : dans un référentiel donné, et selon un repère (d'espace et de temps) clairement défini, il s'agit bien d'un ensemble de coordonnées, spatiales et temporelles désignant donc un point de l'espace à un instant unique :

l'événement (x, y, z, t) (Plus précisément l'événement (x, y, z, ct) par souci d'homogénéité)

d) A retenir:

- **Invariance de c** : la vitesse de la lumière dans le vide, quelle que soit le mouvement de la source de lumière dans le référentiel choisi, a exactement la même valeur dans tous les référentiels galiléens.
- **Événement** : un événement est un ensemble de 4 coordonnées (x, y, z, t) dans un référentiel donné, autrement dit une position associée à une date dans ce référentiel.
- Comme les coordonnées des grandeurs de mouvement (position, vitesse et accélération), le temps est aussi une grandeur relative qui dépend du référentiel choisi. Autrement dit, deux événements simultanés dans un référentiel ne le sont pas dans un autre référentiel en mouvement par rapport au premier. La mesure d'une durée entre deux événements ne donnera donc pas le même résultat selon le référentiel dans lequel cette durée est mesurée.
- **Temps propre** : la durée propre est la durée mesurée entre deux événements dans le référentiel dans lequel les deux événements se produisent au même endroit (en un même point de l'espace). Le référentiel est alors appelé référentiel propre.
- **Dilatation des durées** : la durée ΔT entre deux événements mesurée dans un référentiel en mouvement à la vitesse constante \vec{v} par rapport au référentiel propre est supérieure à la durée propre ΔT_0 entre ces deux événements :

$$\Delta T = \frac{\Delta T_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Le phénomène physique est là, indépendant.

Les coordonnées caractéristiques de ce phénomène dépendent du référentiel choisi.

Le temps doit être considéré comme une coordonnée comme les autres (les coordonnées d'espace).

Le temps ne passe pas de la même manière selon le référentiel choisi pour l'étude du phénomène.

Les différences temporelles liées au choix de référentiels ne sont toutefois perceptibles que si les vitesses relatives des référentiels sont très élevées.

Complément culturel, lecture : « La relativité » de Albert Einstein (Editions petite bibliothèque Payot)

3) Prolongements

a. Activité « GPS » du livre p 261

b. A propos de muons (sujet bac, qui reprend entre autres choses la question ouverte précédemment posée) :

Le muon un explorateur de volcans

Les muons, produits à haute altitude lors d'interactions entre les rayons cosmiques et les noyaux atomiques présents dans l'atmosphère terrestre, traversent cette dernière à une vitesse approchant la célérité de la lumière.

Certains des muons arrivant au sol possèdent une énergie suffisante leur permettant de traverser plusieurs centaines de mètres de roche avant de se désintégrer. Ils sont utilisés pour radiographier les volcans.

Données :

- célérité de la lumière dans le vide $c = 299\,792\,458 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$;

- $1 \text{ eV} = 1,60 \times 10^{-19} \text{ J}$;

- facteur de Lorentz : $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$ où v est la vitesse de la particule dans le référentiel du laboratoire ;

- la durée de vie ΔT d'une particule animée d'une vitesse v , mesurée dans le référentiel du laboratoire, est liée à sa durée de vie propre ΔT_0 par l'égalité :

$$\Delta T = \gamma \Delta T_0 ;$$

- énergie d'une particule de masse m en mouvement : $E = \gamma mc^2$;

- on supposera que dans les conditions de l'expérience une particule chargée en mouvement dans un champ magnétique est soumise à une force magnétique d'intensité proportionnelle à la vitesse de la particule, à la valeur absolue de sa charge et au champ magnétique ; cette force est indépendante de la masse de la particule ;

- masse du muon : $m_\mu = 105,66 \text{ MeV}\cdot\text{c}^{-2}$;

- intensité du champ de pesanteur : $g = 10 \text{ N}\cdot\text{kg}^{-1}$.

Les muons

Découverts en 1936, les muons sont produits à grande hauteur dans l'atmosphère (5 à 30 km) à partir du rayonnement cosmique primaire.

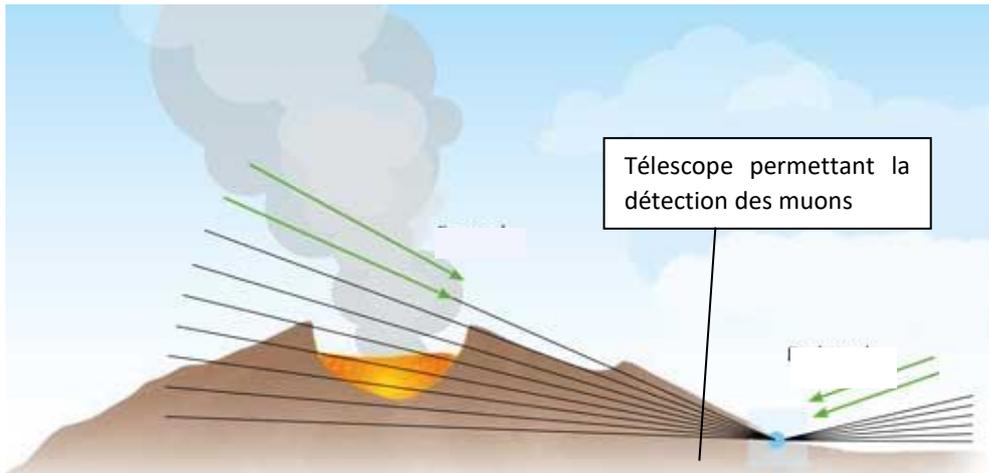
Le muon porte une charge électrique négative. Dans le même champ magnétique et à vitesse égale, sa trajectoire est moins incurvée que celle d'un électron mais plus incurvée que celle d'un proton. En admettant que sa charge électrique négative est égale à celle de l'électron, on déduit que le muon a une masse de valeur comprise entre celle de l'électron et celle du proton.

Un muon créé à une hauteur de 20 km doit mettre environ 67 μs pour arriver au sol. Mais cette durée représente 30 fois la durée de vie du muon...

En 1976, des expériences réalisées au CERN à Genève ont permis de produire un faisceau de muons de vitesse $0,9994c$. Injectés dans un grand anneau de stockage où ils sont confinés par des aimants puissants, ces muons circulent jusqu'à leur désintégration. Bien qu'un muon ne puisse survivre plus de 14 ou 15 tours selon la mécanique newtonienne, la plupart d'entre eux font plus de 400 tours. Les détecteurs d'électrons entourant l'anneau ont montré que ces muons ont un temps de vie environ égal à 30 fois leur temps de vie au repos.

Principe de la radiographie muonique

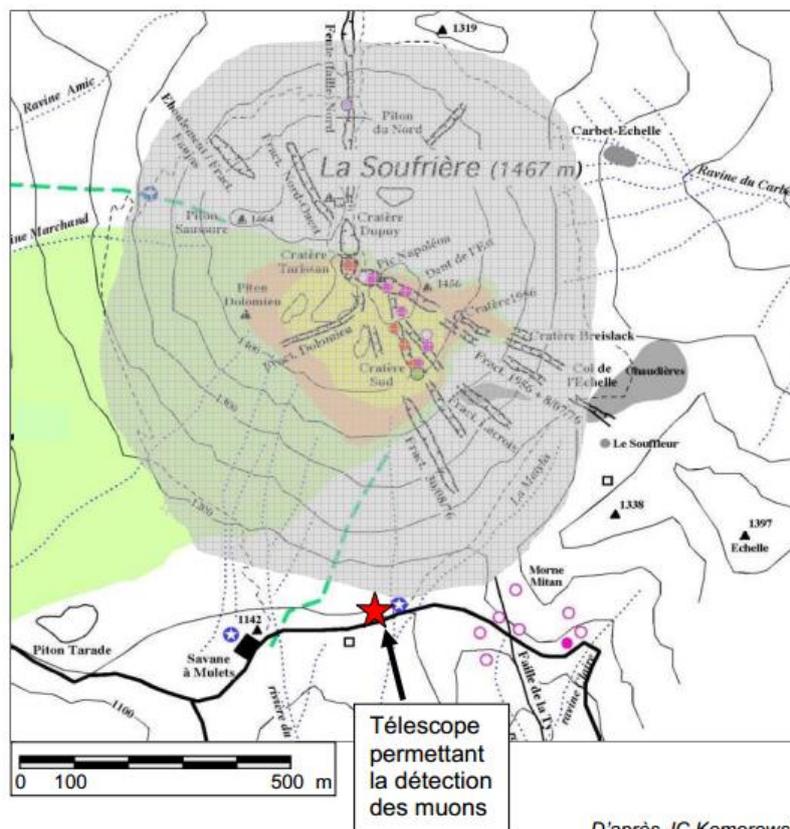
La radiographie muonique utilise les muons quasi-horizontaux : ceux-ci sont absorbés par les roches à travers lesquelles ils sont passés. Plus les roches sont denses, plus les muons sont absorbés.



Au niveau du sol, le flux moyen de muons est d'environ 1 muon par cm^2 et par minute. Chaque muon perd en moyenne 2 MeV par cm de roche traversée. Les muons ordinaires ont une énergie moyenne de 4 GeV. Cependant, certains muons possèdent une énergie très importante, supérieure à 1000 GeV, leur permettant de traverser plusieurs centaines de mètres de roche avant de se désintégrer. Ce sont ces particules qui sont utilisées pour radiographier les volcans. Des télescopes comportant des matrices de détecteurs sont placés en contrebas du volcan pour compter et déterminer les trajectoires des muons possédant suffisamment d'énergie pour traverser le massif rocheux. En comparant le flux de muons ayant traversé le volcan au flux mesuré à ciel ouvert, il est possible de connaître la quantité de matière que les muons ont rencontrée pendant leur traversée.

Carte du volcan de la Soufrière

On peut considérer que la surface S grisée, proche de celle d'un disque de diamètre D , correspond à la surface de la Soufrière exposée au flux de muons.



D'après JC Komorowski

1. Les muons créés en haute atmosphère

1.1. Dilatation des durées

1.1.1. Retrouver à l'aide d'un calcul l'estimation faite dans les documents de la valeur du temps de parcours d'un muon créé à une altitude de 20 km pour arriver jusqu'au sol.

1.1.2. Albert Einstein publie en 1905 une nouvelle théorie intitulée « la relativité restreinte » qui remet en cause la mécanique classique.

Énoncer le postulat d'Einstein relatif à la vitesse de la lumière.

1.1.3. Expliquer sans calcul en quoi la détection d'un nombre important de muons au niveau de la surface terrestre constitue une preuve expérimentale de la « dilatation » des durées.

1.2. Pourquoi peut-on dire que le muon, le proton et l'électron sont soumis à une force magnétique de même intensité lorsqu'ils pénètrent à la même vitesse dans un champ magnétique ?

Justifier pourquoi la différence de courbure alors observée permet d'affirmer que le muon a une masse intermédiaire entre celle du proton et celle de l'électron.

2. Les muons au CERN

2.1. Justifier à l'aide d'un calcul l'affirmation : « Ces muons ont un temps de vie environ égal à 30 fois leur temps de vie au repos ».

2.2. Vérifier alors la cohérence entre les valeurs « 14 ou 15 tours » et « 400 tours » données dans les documents.

3. Les muons pour la tomographie d'un volcan

La tomographie est une technique d'imagerie permettant de reconstruire le volume d'un objet à partir d'une série de mesures.

3.1. Expliquer pourquoi un muon ordinaire d'énergie moyenne de 4 GeV ne peut pas être utilisé pour radiographier la Soufrière.

3.2. Déterminer l'ordre de grandeur de l'énergie apportée pendant une minute par le flux de muons ordinaires sur la surface de la Soufrière. Comparer la valeur obtenue à l'ordre de grandeur d'une énergie de votre choix.

3.3. Déterminer la valeur du rapport v/c où v est la vitesse d'un muon ordinaire d'énergie 4 GeV.

En déduire pourquoi les muons utilisés pour la radiographie volcanique sont qualifiés d'« ultra-relativistes ».

4) Suppléments (facultatif) :

i. Simultanéité

Plaçons-nous dans le référentiel terrestre.

En deux points S_1 et S_2 d'une voie ferrée, distants d'une distance L , sont produits simultanément deux éclairs lumineux. S'il y a effectivement simultanéité, les deux éclairs lumineux se rejoindront en M , point immobile du quai et milieu de S_1S_2 , **puisque la lumière se propage à la même vitesse de S_1 vers M et de S_2 vers M , quel que soit l'état de déplacement du référentiel terrestre (galiléen) au cours de l'expérience (voir postulats)**. Un observateur placé sur le quai en M pourra donc noter la simultanéité des deux évènements (vision de l'éclair provenant de S_1 et vision de l'éclair provenant de S_2)

Un autre observateur est dans un train circulant à la vitesse v par rapport au quai. Il est placé en un point en un point M' qui coïncide avec M à l'instant où les deux éclairs sont produits en S_1 et S_2 .

Pour cet observateur M' , les deux évènements (visions de chaque éclair) ne sont pas simultanés.

Expliquer

ii. Distances

Si les durées mesurées dépendent du référentiel, il est logique que les distances mesurées le soient aussi.

Nous restons sur le même exemple (un train passe en gare à la vitesse v par rapport au quai) et nous posons une nouvelle question : que vaut la longueur du train ?

Mesurons-la d'abord dans le référentiel train, à l'aide d'un repérage lié au référentiel choisi. Soit L la longueur trouvée (on a accroché une corde à une extrémité A' , on a déroulé la corde jusqu'à atteindre l'autre extrémité B' et on a noté la longueur L déroulée.

Et si nous souhaitons mesurer L dans le référentiel terrestre ? Comment procéder (rappelons que le train se déplace) ? Allons-nous trouver le même résultat ?

Y a-t-il une raison de trouver le même résultat ?

« A' et B' se déplacent le long de la voie ferrée à la vitesse v .../... Nous nous demandons d'abord quels sont les points A et B de la voie ferrée devant lesquels les points A' et B' passent à une date donnée t (dans le référentiel terrestre). Ces deux points A et B peuvent être déterminés grâce à la définition du temps.

On mesure alors la distance AB en déroulant une corde entre les deux points.

Il n'est pas du tout prouvé a priori que cette mesure donnera la même valeur L que la mesure réalisée dans le train. La longueur du train, mesurée sur la voie ferrée, peut être différente de celle mesurée dans le train même.../... Si le voyageur parcourt dans le wagon la distance w dans l'unité de temps mesurée dans le train, cette distance n'est pas nécessairement égale lorsqu'elle est mesurée depuis la voie ferrée »

Albert Einstein

iii. Expressions

Toutes les considérations précédentes (parties I, II et III) ont été mises en équations. Les plus immédiates sont celles présentées sous l'appellation de « transformation de Lorentz » :

- (x, y, z, t) sont les coordonnées d'un événement dans le référentiel terrestre.
- (x', y', z', t') sont les coordonnées du même événement dans le référentiel train.
- Le référentiel train est en mouvement de translation rectiligne à la vitesse v par rapport au référentiel terrestre selon l'axe Ox .
- Transformation de Lorentz :

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

$$t' = \frac{t - \frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

(pourra être exploitée et même retrouvée en exercice)

Pourquoi est-ce révolutionnaire ?

Parce que l'on a dépassé la transformation dite galiléenne qui ne permettait pas d'expliquer l'invariance de certaines lois physiques, particulièrement l'invariance de la valeur c dans tout référentiel galiléen.

Rappel de la transformation de Galilée : $x' = x - vt$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

$$t' = t$$

III – Le temps existe-t-il ?