I- Mouvements périodiques

1) Les satellites et les planètes en orbite

a) introduction

Une planète ou un satellite en mouvement orbital autour d'un astre central plus lourd décrit un cercle ou une ellipse sous l'effet d'une force unique : la force de gravitation universelle de valeur (dans le cas de la Terre par rapport au Soleil):

$$F_{S/T} = \frac{G.M_S.M_T}{D^2}$$ avec D = distance centre S-centre T

On fait un schéma et on propose une expression vectorielle de $\vec{F}$ à l'aide d'un vecteur unitaire $\vec{u}$. On définit le terme "force centrale"

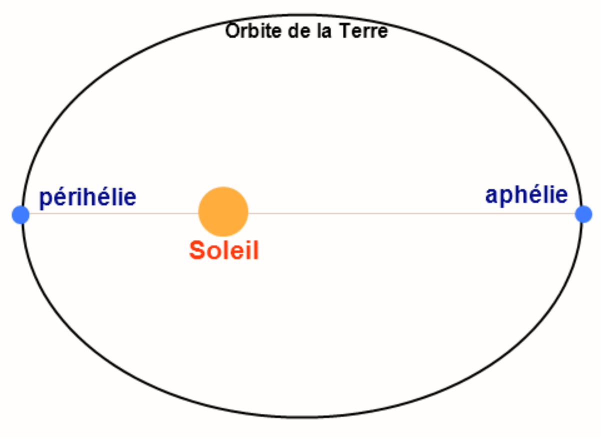
Ces mouvements d'objets célestes visibles par l'homme depuis très longtemps ont été très tôt étudiés sérieusement. Les lois de Kepler, datant du début du 17ème siècle et basées sur des observations approfondies, sont antérieures aux lois de Newton et sont toujours valables (*on peut faire une présentation historique plus développée*).

Voir doc élèves (reprend les paragraphes b) et c) suivants)

b) Les trois lois de Kepler

On rappelle les définitions des référentiels géocentrique et héliocentrique.

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



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

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'éllipse 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)

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

c) Activité expérimentale

- « Les planètes du système solaire » (livre p 192)
- Exploitation rapide des données en direct de satellites terrestres (vérification de la coïncidence entre les données en temps réel et ce que prévoient les lois de Kepler)

a) 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 en particulier 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 affectés de la masse totales des deux corps en interaction et distants de la distance entre les centres des deux corps.

$$F_{S/T} = \frac{G.M_S.M_T}{D^2} \quad \text{avec } D = R_T + h$$

(*un bon schéma peut résumer tout ce préliminaire*)

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

On définit la base (le repère) de Frenet : repère mobile dont l'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 aussi central.

Dans ce repère : $\vec{v} = v.\vec{T}$

$$\vec{a} = \vec{a}_T + \vec{a}_N = \frac{dv}{dt}\vec{T} + \frac{v^2}{R}\vec{N}$$

(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 : $R = R_T + h$)

Si nous établissons que le **mouvement circulaire** étudié est **uniforme**, alors les expressions se simplifierons : v = constante, donc dv/dt = 0, $a_T = 0$, $\vec{a} = a_n \vec{N} = \frac{v^2}{R} \vec{N}$, **l'accélération est centripète** (perpendiculaire au vecteur vitesse et dirigée selon $\vec{N}$ vers le centre du cercle décrit par l'objet en mouvement).

γ – Appliquons la deuxième loi de Newton

- référentiel
- système
- Loi de Newton
- projections dans la base de Frenet
- premiers résultats (mouvement uniforme, expression de v)

δ – Caractéristiques du mouvement circulaire uniforme d'un satellite terrestre

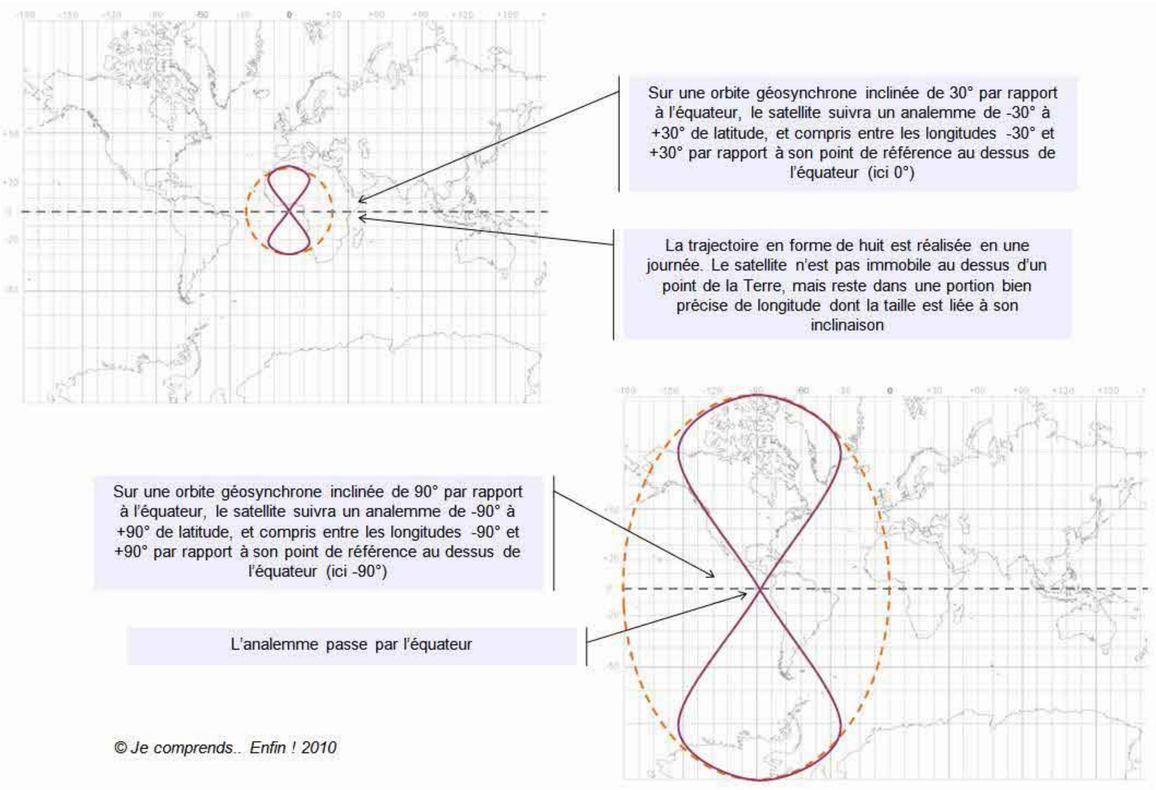
On présente ici :

- période de révolution
- vitesse
- altitude
- retrouver la troisième loi de Kepler
- satellite géostationnaire

ε - Problème scientifique à propos des satellites géosynchrones

Orbite géosynchrone

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° en latitude et en longitude.

http://fr.wikipedia.org

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.

A propos de satellites terrestres en orbite quasi-circulaire.

ISS :
altitude 290 km, période de révolution 90 min
Lune :
Distance centre Terre – centre Lune : 384000 km *période de révolution 27,3 j*

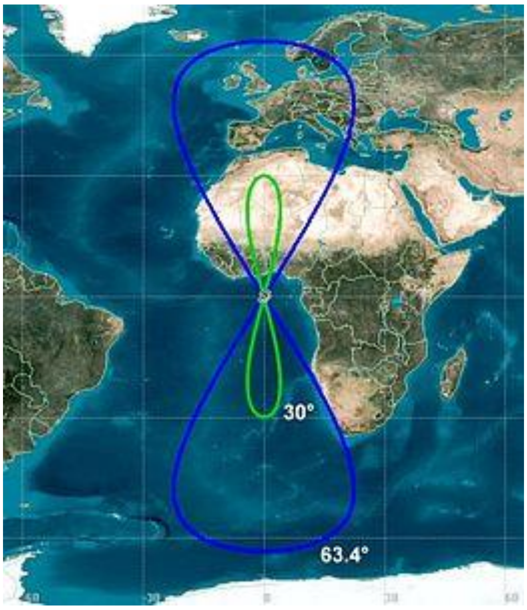
Terre :
Rayon R_T = *6371 km*
Masse $M_T = 5{,}98\times10^{24}$ *kg*

Constante de la gravitation universelle : $G = 6{,}67\times10^{-11}$ *S.I.*

Problème :

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

A quelle altitude se trouve ce satellite ?



2) Les oscillateurs mécaniques

a) Exemples dans le monde qui nous entoure

Un mouvement qui se répète identique à lui-même à intervalles de temps consécutifs égaux est dit périodique. Il est remarquable que la nature nous offre couramment quantités d'exemples de ces phénomènes qui semblent inhérents à la nature même de l'Univers. Un électron a un comportement périodique, que nous pouvons décrire avec le même langage que celui d'une étoile à neutrons en rotation sur elle-même. La rotation de la Terre autour du Soleil, l'oscillation d'une balançoire, le battement rythmé du cœur, le mouvement de la tour Eiffel sous le vent, la vibration du sol au passage d'un véhicule lourd et rapide, la suspension d'une voiture passant sur un obstacle, sont tous plus ou moins périodiques. Ces phénomènes répétitifs sont toujours des mouvements, mais pas toujours descriptibles à notre échelle par les lois de la dynamique. (son, réaction chimique, vibration d'un cristal de quartz, ...)

Parmi ces phénomènes répétitifs, certains se font sur une trajectoire fermée toujours dans le même sens (dans ce cadre on peut dire que E_m, E_p et E_c sont constantes) et **d'autres sont des mouvements de va-et-vient**, ce sont eux que nous appelons mouvement oscillatoires, les systèmes qui décrivent de tels mouvements sont logiquement appelés **systèmes oscillants** (et là, on aura E_m constante, sous la forme d'une somme $E_p + E_c$ avec E_p et E_c non constantes)

b) Caractéristiques d'un système oscillant

Un phénomène mécanique oscillant est caractérisé par un mouvement de va-et-vient qui se répète identique à lui-même de façon régulière 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

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 :

L'amplitude *(schéma)*

c) Le pendule simple

- Présentation

- Pendule pesant : tout système indéformable dont un point différent de G est fixé.
  (*voir exemples et schémas*)
- Pendule simple, définition : masse ponctuelle accrochée à l'extrémité d'un fil inextensible, de masse négligeable et dont l'autre extrémité est fixée.
  (*schéma annoté*)

- Pendule simple, justifier la position d'équilibre (on applique le principe de l'inertie).
- Pendule simple, écart à l'équilibre, abscisse angulaire, amplitude. (schéma complet incluant les forces exercées).
- Pendule simple, description des oscillations en l'absence de frottements, construction du graphe a =f(t) , fonction sinusoïdale où sont mises en évidence période et amplitude (on pourra reprendre un fichier vidéo et l'exploiter judicieusement)
- Pendule simple, influence de différents paramètres sur la valeur de T :
  - amplitude α_{max} ;
  - valeur m de la masse accrochée ;
  - longueur l du pendule (construction de graphe abscisse-ordonnée fortement conseillée).
  - Expression de T_0 (recherches et déduction d'après résultats expérimentaux).

  - ***Activité expérimentale***

<u>Problématique : mesurer la hauteur du lycée</u>

Déterminer la hauteur du lycée en mesurant la période des oscillations d'un pendule simple.

<u>Pistes (manipulations envisagées, questions supplémentaires)</u>

- La période dépend-elle de la longueur du pendule simple ?
- D'autres paramètres (valeur de la masse suspendue, amplitude des oscillations) influencent-ils la valeur de T ? (lorsque nous réaliserons la mesure avec le pendule « hauteur du lycée », devra-t-on être attentif aux valeurs de ces autres paramètres ?
- Proposer une courbe d'étalonnage, exploiter la courbe (la traduire à l'aide d'une formule).
- Mesure + détermination de la hauteur du lycée.

- On terminera en vérifiant que les résultats expérimentaux permettent de valider la formule $T_0 = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$ (qui ne sera pas démontrée)

- Aspect énergétique

(déjà correctement traité lors de la séance « énergies mécaniques »)

- en négligeant les frottements ainsi que la masse du fil, en considérant la masse suspendue comme ponctuelle, exprimer l'énergie mécanique totale du système en mouvement.

- Construire la courbe $E_p = f(\alpha)$ entre $-\alpha_o$ et α_o .;

- considérant qu'un tel système oscille à énergie mécanique constante (oscillateur libre non amorti, aucune dissipation de l'énergie par frottements), tracer sur le même graphe la courbe $E_C = f(\alpha)$ entre $-\alpha_o$ et α_o .

- quand le pendule est laché sans vitesse d'une amplitude initiale $\alpha_o = 20°$, quelle est sa vitesse quand il passe à la verticale ?

- Démonstration de la valeur de T_0 à partir du modèle énergétique (petites valeurs de α_0)

(*plutôt en AP*)

- ***Supplément cours : en présence de frottements***

d) Le système masse-ressort

Etudier le mouvement périodique d'une masse suspendue à un ressort vertical en mesurant la période T des oscillations.

Quelques données théoriques sur les ressorts

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

$$\vec{T} = -k \times \overrightarrow{A_oA}$$

Si une extrémité du ressort est accroché à un point fixe, A_o 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 $\vec{T}$ devient alors :

$\vec{T} = -k.x.\vec{i}$ avec x = $\overline{A_oA}$, allongement du ressort (positif si le ressort est allongé, négatif s'il est comprimé).

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

Donnée à retenir : lorsqu'un ressort est allongé ou comprimé d'une valeur x, il possède une énergie potentielle élastique $E_p = \frac{1}{2}.k.x^2$

Etude des oscillations

- Préliminaire : en manipulant le ressort au repos, déterminer sa raideur (vous présenterez par écrit la méthode choisie).

- Faire osciller le ressort et mesurer le plus précisément possible la période.

- Vérifier l'exactitude de l'expression : $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$

(*cette expression pourra être démontrée… en AP*)

Aspect énergétique

Exploitation des résultats précédents ou d'un fichier vidéo de système masse-ressort horizontal en oscillation

- en négligeant les frottements ainsi que la masse du ressort, en considérant la masse suspendue comme ponctuelle, exprimer l'énergie mécanique totale du système en mouvement.

- Construire la courbe $E_p = f(x)$ entre $-x_o$ et x_o.

- considérant qu'un tel système oscille à énergie mécanique constante (oscillateur libre non amorti, aucune dissipation de l'énergie par frottements), tracer sur le même graphe la courbe $E_c = f(x)$ entre $-x_o$ et x_o.

- quand le ressort, allongé de x_o, est laché sans vitesse, quelle est sa vitesse quand il passe par la position A_o ($x = 0$) ?

e) Conclusions

Un oscillateur libre non amorti évolue :

- à énergie mécanique constante,
- à amplitude constante.

$$E = E_c + E_p = cste$$

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

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

Quand on passe par l'élongation zéro, 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 ?

f) Remarque : en présence de frottements (*voir séance de cours*)

- Expériences :

Mise en oscillation d'un pendule considéré comme simple avec frottements fluide ou solides, enregistrement, acquisition de données, tracé de courbe a=f(t).

Mise en oscillation d'un système masse-ressort horizontal en présence de frottements solides.

- Résultats :

Présentation des graphes a=f(t) (pendule) ou x = f(t) (masse-ressort) dans les cas : régime pseudo-périodique, régime apériodique), valeur de la pseudo-période : T sera considérée comme égale à T_0.

Suppléments exercices :

Intégrer le travail de la force élastique afin d'établir l'expression de E_p élastique

Expliquer que l'expression $1/2mw_0^2x_0^2$ est bien une expression d'énergie cinétique

Diagramme d'échanges d'énergie E_p/E_c dans le cas d'un régime d'oscillations libres pseudo périodiques amorties.

II 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 10^9 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 13e 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 eV = $1{,}6.10^{-19}$ 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) ?

IV – 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, à condition qu'il soit galiléen dans lequel le mouvement est étudié.

Certes, les équations pourront 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 cela n'empêche pas que la Terre attire le caillou et que, quel que soit le référentiel (galiléen) d'étude choisi il y aura chute du caillou vers la Terre… C'est cela l'invariance des lois physiques.

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 : $3{,}00.10^{8}$ $m.s^{-1}$

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, 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). Elle a depuis été améliorée avec des résultats confirmant toujours le postulat :

invariance de c dans tout référentiel galiléen

Pour insister sur le caractère exceptionnel du postulat, on développera une discussion sur la vitesse de propagation d'une autre onde : le son émis par un avion se déplaçant à la vitesse v (avec l'aide de quelques schémas)

2) Simultanéité de deux événements

a) Evénement, 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

*Commencer éventuellement par une lecture du chapitre 8 entier de « **la relativité** » d'Einstein.*

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, 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 n°1, immobile sur la voie ferrée et placé en M pourra, en s'aidant de miroirs judicieusement disposés, attester de la simultanéité des deux évènements dans le référentiel terrestre : éclair provenant de S_1 et éclair provenant de S_2 au même instant en M.

Un observateur n°2 est dans le train en un point M' qui coincide avec M à l'instant où les deux éclairs sont produits en S_1 et S_2.

LES DEUX ÉVENEMENTS SONT L'ÉMISSION DE LUMIÈRE DEPUIS S_1 ET L'ÉMISSION DE LUMIÈRE DEPUIS S_2

Ils sont reçus et arrivent simultanément en M mais n'arrivent pas en même temps en M', puisque l'observateur n°2 se rapproche de S_1 et s'éloigne de S_2. L'observateur n°1 va déduire que les deux événements ont simultanés alors que l'observateur n°2 va déduire qu'ils ne le sont pas.

Version 2 : deux chronomètres sont déclenchés (temps origines t_0 et t'_0 égaux à zéro) en même temps quand M' coïncide avec M, A avec A', B avec B'. L'évènement « éclair provenant de A » correspondra à deux temps différents selon qu'il est capté en M ou en M' ($t'_A > t_A$). Même chose pour l'événement « éclair provenant de B » ($t'_B < t_B$).

- Le temps mesuré, les valeurs trouvées pour des durées ou des dates mesurées par rapport à une origine, ce qui revient au même, sont donc, comme les coordonnées spatiales, liés au choix du référentiel.
- Le temps n'est pas absolu, il est lié au référentiel choisi.
- On va même plus loin avec la notion de durée propre : durée mesurée entre deux événements situés en un même point de l'espace. Cette durée n'est donc la durée propre que dans un seul référentiel appelé logiquement référentiel propre.

Changeons d'exemple : la lanterne allumée en haut du mât d'un bateau…

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.

Dans le référentiel lié au bateau (*voir schéma 1*) :

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

(d est la hauteur du mât et c la vitesse de la lumière dans le vide)

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

On note $\mathbf{\Delta t}$ la durée mise par la lumière pour aller du haut du mât au bas du mât dans le référentiel de la berge. Le calcul s'appuie sur la figure ci-dessus et utilise explicitement le fait que la vitesse de la lumière est aussi égale à c dans le repère 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 $c^2(\Delta t)^2 = (2d)^2 + v^2(\Delta t)^2$ et, comme $2d = c\Delta t_o$, il vient :

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

Comme γ est toujours plus grand que 1, on utilise le terme de « dilatation des durées ».

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 entre le temps et les coordonnées spatiales, elles aussi liées au référentiel choisi.

Donc :

La notion d'événement nous apparait 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)

A retenir:

- **<u>Invariance de c</u> : 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.**

- **<u>Evénement</u> : 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.**

- **<u>Temps propre</u> : 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.**

- **<u>Dilatation des durées</u> : la durée T 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 T_0 entre ces deux événements :**

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

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.

Suppléments :

3) Distances

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

Que vaut la longueur du train (toujours en mouvement à la vitesse v) ?

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 à 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

4) 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*)

<u>Pourquoi est-ce révolutionnaire ?</u>

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 :

$x' = x - vt$

$y' = y$

$z' = z$

$t' = t$

5) Prolongements

- **Exercices simples, notamment celui sur « l'horloge de lumière » et « muon »**

- **Activité « GPS »**