

Se positionner grâce aux ondes GPS, horloges et relativité (2)

Préambule

Extrait du programme d'enseignement spécifique de physique-chimie de la série scientifique en classe terminale ([Bulletin officiel spécial n°8 du 13 octobre 2011](#))

Temps, mouvement et évolution

Notions et contenus	Compétences exigibles
<p>Temps et relativité restreinte</p> <p>Invariance de la vitesse de la lumière et caractère relatif du temps.</p> <p>Postulat d'Einstein. Tests expérimentaux de l'invariance de la vitesse de la lumière.</p> <p>Notion d'événement. Temps propre.</p> <p>Dilatation des durées.</p> <p>Preuves expérimentales.</p>	<p>Savoir que la vitesse de la lumière dans le vide est la même dans tous les référentiels galiléens.</p> <p>Définir la notion de temps propre.</p> <p>Exploiter la relation entre durée propre et durée mesurée.</p> <p>Extraire et exploiter des informations relatives à une situation concrète où le caractère relatif du temps est à prendre en compte.</p>

La situation déclenchante est un texte tiré d'une revue scientifique relatif aux compensations temporelles à apporter aux satellites GPS. Ce texte introduit la notion de relativité et la dilatation des temps pour un observateur immobile.

Un deuxième document permet d'introduire l'invariance de la célérité de la lumière pour faire l'étude d'une horloge afin de retrouver la relation liant la période propre d'une horloge et le temps mesuré par un observateur immobile.

Mots clefs :

GPS, Einstein, relativité, invariance de la célérité de la lumière, expérience de Michelson et Morley, horloge atomique

Compétences abordées

Cette activité permet d'évaluer les compétences générales suivantes :

Compétences attendues :	1	2	3	4
1 – non maîtrisées				
2 – insuffisamment maîtrisées				
3 – maîtrisées				
4 – bien maîtrisées				
Rechercher, extraire et exploiter l'information				
Raisonner, argumenter et faire preuve d'esprit critique				
Communiquer en utilisant des langages et outils pertinents				

La situation

Le temps des GPS

« [...] Aujourd'hui, la plupart des récepteurs GPS grand public peuvent localiser votre position avec une précision de 15 mètres. Cela implique que le système de localisation intègre la théorie de la relativité. Si l'on n'en tenait pas compte, les horloges en orbite ne seraient pas synchronisées avec les horloges au sol. La relativité prédit que le temps s'écoule plus lentement pour des objets se déplaçant rapidement. Chaque satellite GPS parcourant environ 14 000 kilomètres par heure, leur horloge atomique retarde d'environ sept microsecondes par jour par rapport à une horloge au sol. L'effet de la gravitation sur l'écoulement du temps est plus important encore. À une altitude moyenne de 20000 kilomètres, les satellites GPS subissent une attraction gravitationnelle quatre fois moindre qu'au sol. Cet effet avance leurs horloges de 45 microsecondes par jour. Ainsi, le GPS doit corriger un décalage global de 38 microsecondes. Si les satellites n'effectuaient pas cette compensation, on aboutirait à une erreur de 11 kilomètres par jour.

Dans les années 1970, la nécessité de corriger les effets relativistes n'était pas évidente aux yeux des premiers concepteurs du GPS, ingénieurs militaires pour la plupart. Il y eut une controverse, et le premier satellite GPS fut lancé sans correction de fréquence, mais avec une commande à distance pour l'activer en cas de besoin. Il fut vite évident que la correction devait être activée en permanence. [...] »

Philip Yam

Pour la Science n° 326 Décembre 2004

Pourquoi le fait que les satellites GPS se déplacent à grande vitesse induit un décalage entre l'horloge embarquée dans le GPS et l'horloge restée au sol ?

Comment retrouver ce décalage de 7 microsecondes par jour ?

Documents

A propos de la vitesse de la lumière :

Le contexte historique

La vitesse de la lumière joue un rôle central dans la théorie de la relativité. A la fin du 19ème siècle, la communauté scientifique était confrontée à plusieurs problèmes concernant la propagation de la lumière. En effet, le fait que la Terre tourne autour du Soleil à une vitesse v devrait induire une variation de la vitesse de la lumière selon le sens de propagation de la lumière. Si la lumière se propage dans le sens opposé au mouvement de la Terre, on s'attend à mesurer une vitesse $c + v$, où c la vitesse de la lumière dans le vide. Les rayons se déplaçant dans le même sens que la Terre devraient avoir une vitesse $c - v$.

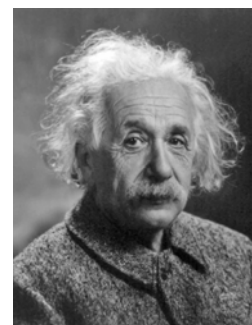
Il restait aux physiciens à mesurer cette différence de vitesse. C'était l'objet de la série d'expériences menées par Michelson et Morley entre 1881 et 1887 basées sur l'utilisation d'interférences lumineuses. Or, ces expériences montrèrent que la vitesse de la lumière était la même dans toutes les directions. Ce résultat valut à Michelson le prix Nobel de physique en 1907. Il resta inexploité jusqu'en 1905, date à laquelle Einstein publia son article sur la relativité.

Simulation de l'expérience, consulter par exemple le site de Michael Fowler :
http://galileoandeinstein.physics.virginia.edu/more_stuff/flashlets/mmexpt6.htm

La théorie de la relativité restreinte postule que :

La vitesse de la lumière dans le vide est la même dans tous les référentiels galiléens.

Albert Einstein en 1947.



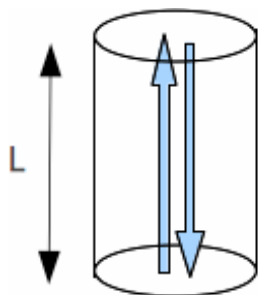
Notion de temps propre :

Une conséquence importante de l'invariance de la lumière est que le temps ne s'écoule pas de la même façon dans deux référentiels galiléens en mouvement l'un par rapport à l'autre.

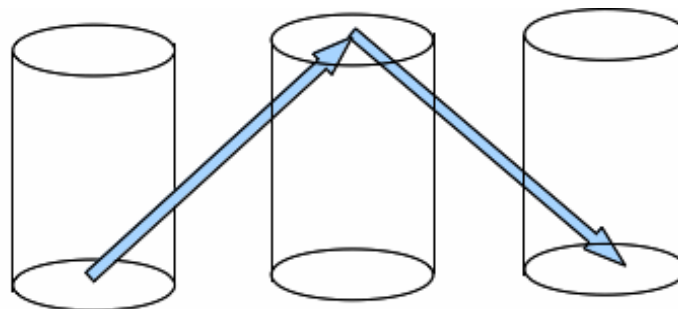
Ce phénomène peut être mis en évidence à l'aide d'une horloge de lumière. Une horloge de lumière est constituée d'une tube fermé par deux miroirs. La lumière effectue des aller-retour dans le tube. Ces va-et-vient jouent le rôle du balancier dans une horloge.

Observons une horloge se déplaçant latéralement à une vitesse v par rapport au sol. Comparons le point de vue d'un observateur mobile se déplaçant avec l'horloge et celui d'un autre observateur immobile (par rapport au sol).

Chacun des observateurs mesure le temps mis par la lumière pour effectuer un aller-retour.



Observateur mobile se déplaçant **avec** l'horloge



Observateur **immobile** observant le déplacement de l'horloge

On note Δt_p le temps mesuré par l'observateur mobile, et Δt celui mesuré par l'observateur immobile.

Le temps Δt_p mesuré par un observateur se déplaçant avec cette horloge est appelé temps propre.

Pistes pour les élèves

Questions

- Donner l'expression du temps propre Δt_p (mesuré dans le référentiel de l'horloge) en fonction de L et c .
- Du point de vue de l'observateur immobile, indiquer sur le schéma la distance D parcourue par la lumière pour le trajet aller. Établir l'expression de Δt en fonction de D et c .
- Comparer qualitativement Δt par rapport au temps propre Δt_p .
- Exprimer alors Δt en fonction de Δt_p , v et c .

Retour au système GPS

En utilisant les données du texte de Philip Yam, retrouver le retard de $7 \mu\text{s}$ par jour des horloges GPS embarquées par rapport aux horloges terrestres.

Conclure.

Questions complémentaires (en autonomie):

Un vaisseau spatial part de la Terre pour rejoindre une étoile située à 100 a.l. Le vaisseau se déplace avec une vitesse constante correspond à 99% de c . Quelle sera la durée du voyage pour un observateur terrestre ? Quelle sera cette durée pour un passager du vaisseau ?

Source : http://fr.wikipedia.org/wiki/Relativité_restreinte