

Se positionner grâce aux ondes GPS, horloges et relativité (1)

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>

Les documents proposés présentent la nécessité de prendre en compte le caractère relatif du temps par les satellites GPS ainsi que le principe de synchronisation des horloges.

Le professeur pourra proposer aux élèves tout ou partie des documents à partir desquels l'élève fera une synthèse ou un commentaire argumenté sur une problématique que le professeur définira.

Il est également possible de laisser l'initiative du choix de la problématique à l'élève.

Mots clefs :

GPS, horloge atomique, localisation, synchronisation

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				
Restituer et mobiliser les connaissances exigibles				
Rechercher, extraire et exploiter l'information				
Raisonner, argumenter et faire preuve d'esprit critique				
Communiquer en utilisant des langages et outils pertinents				

Exemples de sujets :

- Après avoir déterminé la précision minimale de la mesure de la durée du trajet effectué entre le satellite et l'utilisateur du GPS, justifier l'utilisation d'une horloge atomique et expliciter le problème posé par l'horloge de l'utilisateur.
Construire une modélisation à partir du schéma proposé dans le document 3, en supposant que les balises émettent des signaux sonores. Commenter alors les phrases suivantes, extraites de ce document :
 - « si son horloge avance par rapport à la balise, son évaluation de la distance à la balise sera sous-estimée ; si elle est en retard, la distance sera surestimée » ;
 - « en comparant les points trouvés, le promeneur saura s'il avance ou s'il retarde, et de combien ».
- Après avoir calculé la valeur de la vitesse d'un satellite GPS sur son orbite, discuter de la pertinence des données numériques de la phrase suivante, extraite du document 1 : « chaque satellite GPS parcourant environ 14000 km par heure, leur horloge atomique retarde d'environ 7 microsecondes par jour par rapport à une horloge au sol ».

Documents

Document 1 :

« Les idées d'Einstein sont essentielles pour de nombreux domaines de la science. Elles permettent aux physiciens de décrire des particules lancées à des vitesses proches de celle de la lumière, et aux astronomes de prévoir le devenir de l'Univers ou de modéliser les trous noirs. Les retombées des travaux d'Einstein se manifestent cependant aussi dans nos contacts quotidiens avec la technique [...] Pour rencontrer Einstein, aventurez-vous, un après-midi, dans le centre commercial le plus proche de chez vous. [...]

Visitez ensuite le magasin de sport, et plus précisément le rayon « randonnée » ; vous y trouverez certainement des récepteurs GPS. Ces appareils portables donnent pour moins de 150 € la latitude, la longitude, et l'altitude de n'importe quel lieu en captant les signaux émis par les satellites du système américain de localisation. Les mesures de distance exigeant un minutage précis, chacun des 24 satellites GPS contient une horloge atomique.

Aujourd'hui, la plupart des récepteurs GPS grand public peuvent localiser votre position avec une précision de 15 m. Cela implique que ce 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 km par heure, leur horloge atomique retarde d'environ 7 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 20 000 km, les satellites GPS subissent une attraction gravitationnelle quatre fois moindre qu'au sol. Cet effet avance leur horloge de 45 microsecondes par jour. Ainsi, le GPS doit corriger un décalage global de 38 microsecondes par jour. Si les satellites n'effectuaient pas cette compensation, on aboutirait à une erreur de 11 km par jour [...] »

Extrait de « Du GPS au DVD », *Pour la science* n°326, décembre 2004

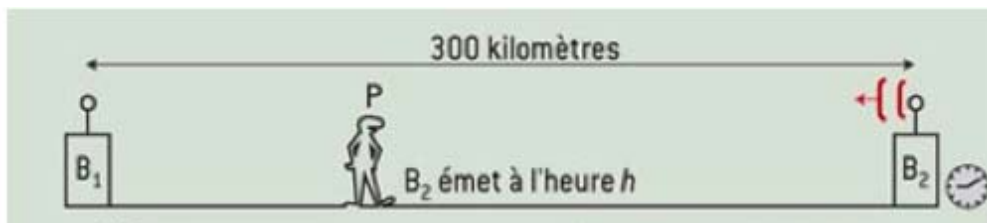
Document 2 :

« [...] Le GPS comprend une constellation de 24 satellites, dont chacun emporte une horloge atomique de haute précision sur une orbite circulaire autour de la Terre. A l'image d'une horloge parlante, chaque satellite émet régulièrement un signal électromagnétique indiquant l'heure d'émission, tandis que le récepteur détecte l'heure d'arrivée du signal. De ces deux informations, heure d'émission et heure de réception, l'utilisateur déduit la durée d'un aller simple du signal, donc la distance qui le sépare du satellite. En y ajoutant les positions des satellites, également spécifiées dans les signaux émis, le calculateur électronique du récepteur GPS détermine la position de l'utilisateur. [...] »

Extrait de « Connaître sa position, un problème de relativité », *Pour la science* n°326, décembre 2004

Document 3 :

« Pour minimiser l'erreur sur les distances, toutes les horloges du système doivent être parfaitement à l'heure. Qu'implique cette condition? Pour simplifier, oublions l'atmosphère : supposons que la lumière se propage dans le vide, c'est à dire à la vitesse de 299 792,458 km/s. Pour déterminer une distance à 10 m près, il faut alors mesurer la durée du trajet avec une précision d'environ 30 nanosecondes. Les horloges atomiques embarquées à bord des satellites n'ont aucune difficulté à rester au-dessous de cette marge d'erreur. En revanche, l'utilisateur au sol ne peut disposer d'une horloge de ce type, chère et volumineuse. Pour pallier cela, l'horloge électronique de l'utilisateur, relativement peu précise, est remise régulièrement à l'heure à l'aide des signaux en provenance des satellites.



Prenons un exemple à une dimension. Un promeneur se déplace le long d'une route rectiligne, et souhaite déterminer sa position. Il possède un récepteur, mais ignore si son horloge est à l'heure par rapport aux balises émettrices situées aux deux extrémités de la route. S'il n'utilise que le signal d'une seule balise, une erreur de synchronisation entraîne une erreur de position : si son horloge avance par rapport à la balise, son évaluation de la distance à la balise sera sous-estimée ; si elle est en retard, la distance sera surestimée. Supposons qu'il utilise successivement les signaux des deux balises (synchronisées) pour déterminer sa position. Si son horloge est à l'heure, il déduira des deux signaux la même position. Si elle avance ou retarde, en revanche, il obtiendra deux positions différentes. En comparant les points trouvés, le promeneur saura s'il avance ou s'il retarde, et de combien [...] »

Extrait de « Connaître sa position, un problème de relativité », *Pour la science* n°326, décembre 2004