

Effets relativistes sur la désynchronisation des horloges propres des satellites GPS

J'ai trouvé intéressant d'étudier les effets de la relativité qui sont rarement pris en compte bien qu'ils soient beaucoup trop importants pour être négligés. A l'aide de données de laboratoire, j'avais également la possibilité de faire des calculs sur des données précises et donc d'avoir des résultats visibles.

Les satellites de télécommunication ont aujourd'hui un rôle central dans la société. Cependant de nombreux effets dont les retards de propagation, l'effet Doppler et surtout les effets de la relativité dus aux vitesses relatives entre les satellites et le décalage d'Einstein doivent être pris en compte pour assurer leur fonctionnement.

Positionnement thématique (ETAPE 1)

PHYSIQUE (Physique Théorique), INFORMATIQUE (Informatique pratique), MATHEMATIQUES (Géométrie).

Mots-clés (ETAPE 1)

| Mots-Clés (en français) | Mots-Clés (en anglais) |
|----------------------------------|--------------------------------|
| <i>satellite</i> | <i>satellite</i> |
| <i>temps propre</i> | <i>proper time</i> |
| <i>Equation de Kepler</i> | <i>Kepler's equation</i> |
| <i>Transformation de Lorentz</i> | <i>Lorentz Transformation</i> |
| <i>Décalage d'Einstein</i> | <i>Gravitationnal Redshift</i> |

Bibliographie commentée

Le GPS est un système de positionnement d'un point sur Terre utilisant des satellites dont les trajectoires peuvent être étudiées à l'aide de l'équation de Kepler [1][3][5]. Cette équation est associée à 6 paramètres orbitaux, 3 pour situer l'orbite sur un plan et 3 pour situer la position du satellite sur l'orbite. La Nasa a calculé les paramètres orbitaux de chaque satellite et mis en place une représentation standardisée appelée TLE (Two-Line Element Set) ou paramètres orbitaux à deux lignes, décrivant un ensemble de caractéristiques majeures du satellite dont les paramètres orbitaux permettant de résoudre l'équation de Kepler. Le GPS est aujourd'hui un objet commun, mais il est le fruit de la recherche fondamentale et contribue encore à la développer. Bien que son utilisation soit simple pour la plupart, son fonctionnement fait en réalité appel à des notions compliquées de la physique relativiste [1][3][5] et de la physique quantique qui ont permis d'obtenir des horloges atomiques extrêmement précises. En effet, si le principe de base du fonctionnement du GPS repose essentiellement sur la triangulation de la position via des signaux électromagnétiques émis par les satellites [3][5], la résolution de l'équation de navigation (possédant 4 inconnues : 3 pour la position et une pour le temps) impose que le temps soit le même pour tous [3], ce qui est loin d'être le cas à une si grande échelle où les effets de la relativité ne peuvent être négligés. Parmi tous les problèmes qui font obstacle au bon fonctionnement des GPS, tels que les interférences,

l'effet Doppler, ou encore les retards de propagation des ondes dus à la traversée de l'atmosphère, les problèmes liés à la relativité sont probablement les plus importants avec un décalage d'environ 12 Km par jour juste pour les effets relativistes liés à la gravitation [5].

En 1905, l'année durant laquelle Einstein publie « Sur l'électrodynamique des corps en mouvement » posant les bases de la théorie de la relativité restreinte, Henri Poincaré publie une version corrigée des « Transformations de Lorentz » [2][5], publiées en 1904. Ces transformations permettent d'exprimer les nouvelles coordonnées d'un point lors d'un changement de référentiel galiléen en suivant les lois établies par la théorie de la relativité restreinte. Les lois de la relativité restreinte énoncent que lors d'un changement de référentiel galiléen, seule la vitesse de la lumière est la même pour les deux référentiels et qu'il en résulte une contraction des longueurs et une dilatation du temps. Ainsi, au regard des distances et des vitesses entre les satellites GPS qui communiquent à l'aide de signaux voyageant à la vitesse de la lumière, on ne peut ignorer la différence de vitesse d'écoulement du temps entre deux satellites. Il est donc nécessaire de calculer la différence de durée qui s'écoule au cours du temps entre deux satellites pour obtenir la meilleure synchronisation possible entre les horloges propres de chaque satellite. Ce problème ne s'applique d'ailleurs pas qu'aux GPS mais à tous les satellites en général, notamment ceux utilisés pour la recherche comme les trois satellites de la mission LISA qui iront détecter les ondes gravitationnelles.

Cependant il faut également faire face à un deuxième problème pour synchroniser les horloges propres des satellites entre elles et par rapport à la Terre. En effet, un deuxième décalage, appelé « Décalage d'Einstein » qui stipule que la fréquence d'un photon varie au cours de sa propagation sous l'influence du champ gravitationnel dans lequel il est plongé, découle directement de la théorie de la relativité générale. Tout va dépendre du champ de gravitation dans lequel sont plongés les satellites, ce décalage met donc en jeu la masse des astres les plus importants et les plus proches ainsi que leur distance par rapport aux satellites. Dans le cadre de l'étude des satellites GPS, les astres qui influenceront le plus sur ce décalage sont le Soleil, la Terre, la Lune et Jupiter.[4][5][6][7]

Problématique retenue

Il s'agit d'étudier la désynchronisation des horloges propres des satellites GPS liée aux vitesses relatives entre eux à partir de données sur les satellites construites numériquement, et dans un deuxième temps d'étudier l'évolution de cette désynchronisation au cours du temps dans le cadre de la Relativité Générale.

Objectifs du TIPE

- 1) Créer les fichiers d'orbite des satellites GPS Galileo 23 et Galileo 25.
- 2) A partir de ces fichiers, calculer la désynchronisation des horloges due aux vitesses relatives entre les satellites GPS.
- 3) A partir du fichier d'orbite du laboratoire AstroParticules et Cosmologie , calculer la désynchronisation des horloges due aux vitesses relatives entre les satellites de la constellation LISA.
- 4) Calculer la désynchronisation due à la gravité entre les trois satellites GPS par rapport au temps coordonné du GCRS puis entre les satellites de la constellation LISA par rapport au temps

coordonné du BCRS.

Références bibliographiques (ETAPE 1)

- [1] LUC DURIEZ : Cours de Mécanique céleste classique : http://lal.univ-lille1.fr/mecacel_duriez/CoursMCecr_Duriez.pdf
- [2] PIERRE SALATI : Introduction à la relativité restreinte : http://lapth.cnrs.fr/pg-nomin/salati/cours_TD_phys_601_pc.pdf
- [3] WIKIPEDIA : Global Positioning System : https://fr.wikipedia.org/wiki/Global_Positioning_System
- [4] WIKIPEDIA : Décalage d'Einstein : https://fr.wikipedia.org/wiki/Décalage_d'Einstein
- [5] HYPERPHYSICS : General Relativity : <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Relativ/gratim.html>
- [6] SWINBURNE UNIVERSITY : Gravitational Redshift : <https://astronomy.swin.edu.au/cosmos/g/Gravitational+Redshift>
- [7] JEAN-PIERRE LIÈVRE, DELPHINE CHAREYRON : La physique du GPS : <http://culturesciencesphysique.ens-lyon.fr/ressource/GPS-2.xml>
- [8] MICHEL LE BELLAC : RELATIVITE GENERALE POUR DEBUTANTS : <https://cel.archives-ouvertes.fr/cel-00092961/document>
- [9] WIKIPEDIA : Métrique de Schwarzschild : https://fr.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9trique_de_Schwarzschild

DOT

- [1] *Création des fichiers d'orbites des Satellites Galileo 23 et Galileo 25 à partir de leur TLE trouvées en ligne à l'aide de Python (utilisation des modules poliastro et astropy) et calcul de l'anomalie excentrique à partir de l'anomalie moyenne et de l'excentricité en utilisant la méthode de Newton.*
- [2] *Calcul de la désynchronisation des horloges des satellites GPS et de la constellation LISA liée à la Relativité Restreinte.*
- [3] *Création des fichiers d'orbites des astres et calcul des sommes des potentiels gravitationnels pour les GPS et pour LISA.*
- [4] *Calcul du décalage d'Einstein des satellites GPS et de la constellation LISA dans le cadre de la Relativité Générale.*