

Fissiaux Laurent
1^{ère} licence en Sciences Physique



Du GPS à GALILEO

Table des matières :

1) Introduction	3
2) Généralités sur le système de positionnement par satellite.....	4
a) Les différents systèmes :	4
I) Le GPS	4
II) GLONASS	4
III) GALILEO.....	5
3) Pourquoi les européens veulent-ils avoir un système de navigation par satellite ?.....	6
4) Principe de fonctionnement d'un système de navigation par satellite.	6
a) Principe général de fonctionnement.....	6
b) Le positionnement des satellites dans l'espace.	7
c) Les Horloges atomiques	9
I) Principe de Fonctionnement.....	9
II) Horloge atomique à jet de césium.....	9
d) Les corrections.	10
I) Relativité restreinte.	10
II) La relativité générale.....	11
5) Les différentes applications possibles du système de positionnement par Satellite.	12
a) Les Transports :.....	12
I) Par route.	12
II) Dans l'air.....	12
III) En mer.	12
IV) Sur les rails.	13
b) En agriculture :.....	13
c) La pêche.	13
d) En matière de sécurité :.....	13
I) Sécurité routière.	14
II) Prise en main des urgences et des incidents.....	14
III) Sécurité dans le transfert de données cryptées.	15
6) Conclusion.....	16
7) Bibliographie.....	17

1) Introduction

En à peu près 20 ans, le système de positionnement par satellites est devenu un outil incontournable dans diverses activités quelles soient professionnelles ou ludiques, au même titre que le pc et le GSM qui sont des exemples parmi tant d'autres. En effet, nous retrouvons aujourd'hui le système GPS (qui est un abus de langage) dans les voitures. Non pas comme un objet de luxe, mais comme un outil nécessaire aux personnes qui voyagent beaucoup.

Il est courant d'appeler ce système de navigation par satellites, le système GPS. Mais d'ici quelque temps, ce terme sera un abus de langage. En effet, d'ici fin 2010, un système équivalent mais européen viendra concurrencer le système GPS. Son nom : GALILEO. Ce projet lancé en 2002 entre dans sa deuxième phase. Fin du mois de novembre 2005, le premier satellite test a été lancé de la base de Baïkonour. GIOVE-A, c'est le nom de ce satellite, testera le bon fonctionnement du matériel embarqué. C'est surtout l'occasion de tester, les deux horloges atomiques les plus précises jamais envoyées dans l'espace. Et il commencera également à émettre des signaux pour le réglages des équipements au sol.

Ce travail va tenter de faire le point sur les systèmes de positionnement par satellites et de montrer les qualités et futures applications du système européen Galileo.

2) Généralités sur le système de positionnement par satellite.

a) Les différents systèmes :

I) Le GPS

Le GPS ou Global Positioning System a été développé par l'armée américaine à partir de 1965 afin de pouvoir localiser ses avions, ses chars ou ses missiles à quelques mètres près, n'importe où sur le globe. Le GPS est donc contrôlé par le département de la défense américaine. Les premiers satellites ont été lancés à partir de 1989. D'abord, il était uniquement réservé aux militaires, ensuite il a été rendu accessible aux civils. Mais les signaux destinés aux services civils qui utilisaient le GPS, étaient envoyés avec une dégradation volontaire et aléatoire. La précision pour les civils étaient alors de la centaine de mètre pour les coordonnées planes et de 150 mètres en altitude. Mais au 1^{er} mai 2000, le président Clinton a décidé l'arrêt de cette dégradation. Ce qui permet aujourd'hui d'avoir une précision légèrement inférieure à 10 mètres en coordonnées planes et de 30 mètres en altitude. Mais le système GPS ne donne pas uniquement sa position géographique ! Comme il recalcule sa position toutes les secondes, le récepteur peut fournir des informations sur la vitesse, la direction, etc...

Quelques chiffres :

- 24 satellites
- 6 orbites
- 20 000 km d'altitude

II) GLONASS

GLObal NAVigation Satellite System est le système de navigation par satellite russe. Il a, comme le GPS, vu le jour pendant la guerre froide. Les premiers satellites furent placés en orbite en octobre 1982. En 1993, les 24 satellites étaient en place. Seulement, depuis 1995, en raison de la faible durée de vie des satellites GLONASS n'est plus complètement opérationnel. Aujourd'hui, seulement 12 satellites sont toujours en service. Le système est lui sous contrôle totalement militaire et n'a connu aucune application dans le domaine civil. Sa précision horizontale est de 55 mètres et de 70 mètres pour la précision verticale.

III) GALILEO

Projet Européen qui viendra en 2010 concurrencer le système GPS qui a pour l'instant le monopole mondial de la navigation par satellite. Il reposera sur une constellation de 30 satellites et de stations terrestres permettant de fournir des informations sur la position géographique mais aussi, comme pour le GPS, la vitesse et la direction de l'utilisateur. Contrairement à son homologue américain et russe, il sera placé sous le contrôle d'autorités civiles. La précision attendue est de l'ordre du mètre ! Ce qu'aucun autre système public ne permet actuellement. Il sera composé de 30 satellites (27 opérationnels et 3 en réserve active). Grâce à ces trois satellites de réserves, le système GALILEO jouera un rôle important et adapté dans les applications dans lesquelles la sécurité est capitale, comme le contrôle du trafic ferroviaire, la régulation de la circulation routière et le suivi des avions en phase d'atterrissage.

Galileo diffusera 10 signaux :

- ◇ 6 pour les services gratuits
- ◇ 2 pour le service commercial
- ◇ 2 pour le service public réglementé

Cinq services seront prévus :

- **Le service ouvert** équivalent au service gratuit du GPS mais avec une précision plus grande : de l'ordre du mètre.
- **Le service commercial** : en échange d'une redevance versée l'opérateur Galileo, il offrira de nombreux services à valeur ajoutée (garantie du service, intégrité et continuité du signal, etc...). C'est principalement les abonnements à ce service qui financeront Galileo.
- **Le service de sûreté de la vie** : il délivrera un service sécurisé, intègre et certifiable, qui seront utilisés uniquement par les applications critiques sur le plan de la sécurité de la vie tels que le transport aérien, maritime et terrestre.
- **Le service public réglementé.**
- **Le service de recherche et secours.**

3) Pourquoi les européens veulent-ils avoir un système de navigation par satellite ?

En mettant au point Galileo, l'Europe met fin à une situation de dépendance vis-à-vis d'un système monopolistique contrôlé par une puissance militaire extérieure. En effet Galileo permettra de garantir aux états européens, l'intégrité, la qualité et la sécurité d'un signal de navigation par un système, non contrôlé par une seule autorité (de surcroît militaire) ou un seul pays. Il faut aussi savoir qu'en cas de conflit, le département américain de la Défense peut à tout instant « brouiller » localement le signal GPS, privant ainsi les utilisateurs civils d'informations qui peuvent leur être indispensables, voire vitales dans l'exercice de leurs activités. Avec Galileo, tous ces inconvénients seront supprimés et d'autres services seront mis à la disposition du public.

4) Principe de fonctionnement d'un système de navigation par satellite.

a) Principe général de fonctionnement.

Dans le passé, un navigateur ou un randonneur pouvait estimer sa position en mesurant les directions de plusieurs points de repères qu'il reporterait ensuite sur une carte les droites issues de ces points de repères. L'intersection de toutes ces droites donnaient alors la position. Cependant, cette méthode ne donnait pas directement d'information sur les distances. On pouvait quand même y avoir accès en mesurant sur une carte d'échelle connue, soit par triangulation.

Pour le système de positionnement, c'est le même principe, à part que les points de repères sont les satellites en orbites autour de la terre. Seulement ces satellites ne sont pas en orbite géostationnaire ! Il faut donc connaître à tout moment la position des satellites. C'est pour cela qu'il y a sur terre des stations de contrôle des satellites qui déterminent l'endroit dans l'espace où se trouvent ceux-ci et synchronisent les horloges atomiques qu'il y a à bord.

Pour une localisation à une dimension, il faut 2 points de repère. Pour déterminer sa position dans 2 dimensions, il en faut trois ! Par conséquent pour ce localiser dans les plans x, y et z, il faut 4 satellites. Une fois tous les points de repères localisés dans l'espace, il faut connaître la distance qui sépare le récepteur de 4 satellites. Mais comment déterminer cette distance ? Le satellite émet régulièrement un signal électromagnétique indiquant l'heure d'émission au récepteur. Celui-ci détecte l'heure d'arrivée du signal. De ces deux informations, l'utilisateur ou du moins le récepteur calcule le temps nécessaire au signal pour parcourir la distance

qui sépare le satellite de l'utilisateur. En connaissant le temps de parcours le récepteur peut déterminer la distance qui, couplée aux positions des satellites, permet une localisation précise de l'utilisateur.

Pour connaître sa position précisément tout est une question de temps ! Cela implique l'utilisation d'horloge très précise. C'est pourquoi les satellites embarquent des horloges atomiques. Les satellites de Galileo auront avec eux une horloge atomique la plus précise jamais envoyée dans l'espace. Ce qui lui permettra d'avoir une précision de l'ordre du mètre. Si on calcule l'erreur maximale tolérée pour avoir cette précision on obtient :

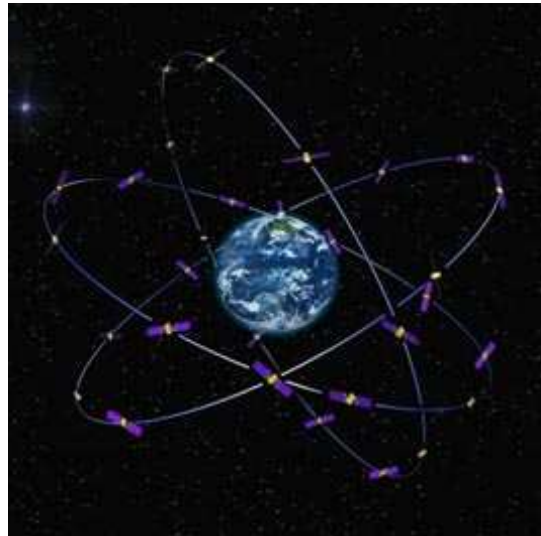
$$\Delta t = 2 \text{ m} / 299\,792\,458 \text{ m/s} \approx 6,67 \cdot 10^{-9} \text{ s}$$

Les horloges atomiques sont beaucoup plus précises. Celles envoyées dans le cadre du projet Galileo devraient avoir une précision de l'ordre du milliardième de seconde. On pourrait alors se dire que tout va très bien dans le meilleur des mondes, mais ce n'est pas le cas ! En effet, les récepteurs au sol ne peuvent pas avoir cette précision car il leur est impossible de disposer d'une horloge atomique. Pour palier à ce problème, l'horloge du récepteur est régulièrement remise à l'heure par l'envoi de signaux depuis le satellite.

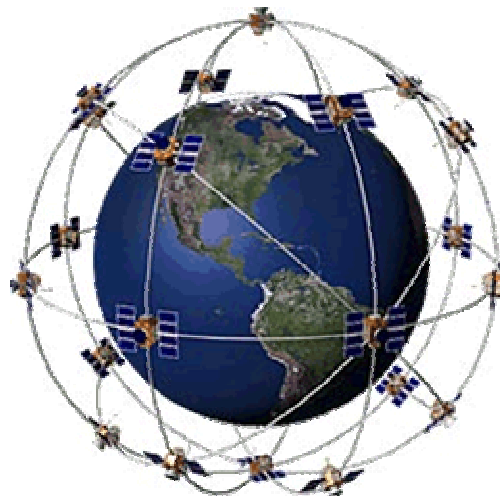
b) Le positionnement des satellites dans l'espace.

Les satellites ne peuvent pas être mis en orbite de n'importe quelle manière ! Pourquoi ? D'abord parce que le trafic là-haut est assez encombré et il faut éviter toutes collisions mais surtout, parce que n'importe où sur terre un récepteur doit pouvoir recevoir les signaux de 4 satellites. C'est pourquoi les 27 satellites sont repartis sur 3 orbites circulaires à 23 616 Km. L'angle formé entre deux orbites est de 56°, ce qui permet de capter les signaux des satellites entre 75° de latitude Nord et Sud.

Répartition des 30 satellites au tour de la terre :



Pour le système GPS, les 24 satellites sont repartis sur 6 orbites comme suit :



c) Les Horloges atomiques

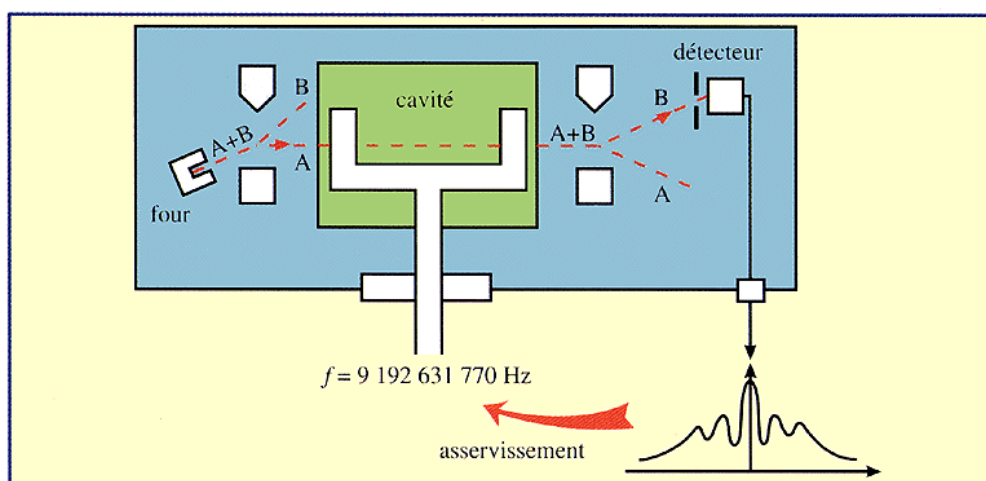
I) Principe de Fonctionnement

Pour donner le tic tac d'une horloge atomique, on utilise les transitions entre des niveaux d'énergie bien définis de certains atomes. Leur développement a commencé dans les 1950 grâce aux connaissances acquises dans différents domaines de la physique (physique atomique, électronique quantique, en relativité) et aussi des progrès de la radioélectricité et des composants électroniques. Mais pourquoi utiliser ces transitions atomiques ? Parce que ce processus permet de réaliser des horloges qui présentent l'avantage d'être stables à long terme et d'être reproductibles. Alors que les autres systèmes utilisant une résonance mécanique, acoustique ou électrique, ne peuvent atteindre. Qui plus est, la définition de la seconde a été établie d'après un phénomène atomique, en 1967, lors de la 13^{ème} Conférence générale des poids et mesures. La seconde, unité de temps du système international d'unités, est définie comme suit : « La seconde est la durée de 9.192.631.770 périodes de la radiation correspondant à la transition entre les deux niveaux hyperfins de l'état fondamental de l'atome de césium 133. »

Dans le cas des horloges atomiques embarquées dans le système GPS, il s'agit de 2 horloges à jet de césium et de 2 horloges à cellule de rubidium.

II) Horloge atomique à jet de césium.

Les atomes de césium ont deux niveaux hyperfins ($F = 3$ et $F = 4$). Dans une horloge atomique à jet de césium, le jeu consiste à faire varier la fréquence d'oscillation d'un quartz pour avoir le plus grand nombre de transitions atomiques entre deux niveaux de l'atome de Césium (Cs).



Un jet d'atome est produit par un four chauffé. Ce jet contient des atomes de Cs qui sont dans les états $F = 3$ et $F = 4$. Les atomes de niveau $F = 3$ sont déviés par champ magnétique dans la cavité de Ramsey. Celle-ci est constituée de deux branches produisant un champ micro-onde de fréquence ajustable. Sous l'effet de ce champ micro-onde, l'atome de niveau $F = 3$ peut être excité vers le niveau $F = 4$. Un second champ magnétique dévie les atomes $F = 4$ vers un détecteur qui ajuste la fréquence du quartz pour obtenir le plus grand nombre de transitions du niveau 3 vers le niveau 4. Cette fréquence est égale à 9 192 631 770 périodes ce qui est la définition de la seconde.

Dans les horloges atomiques au Rubidium on a le même principe de fonctionnement que celles au jet de Césium mais avec une précision moindre. Mais un des gros avantages des horloges au Rb c'est leur petite taille. GIOVE-A va tester une horloge atomique au rubidium et GIOVE-B qui sera lancé dans le premier semestre 2006 aura quant à lui une horloge atomique à l'hydrogène.

d) Les corrections.

Pour être précis, on a déjà vu que tout est une question de temps, et il faut donc que toutes les horloges soient synchronisées. Quelles sont les corrections à effectuer pour garder une bonne synchronisation ?

1) Relativité restreinte.

Prenons un exemple souvent cité pour expliquer la dilatation du temps. Prenons une horloge lumineuse dans un satellite se déplaçant à grande vitesse. La seconde est déterminée par le parcours entre les deux extrémités de l'horloge. Un observateur dans le satellite verra le temps de parcours du rayon lumineux étant égal à 1 seconde. Par contre, un observateur au sol ne verra pas le temps de parcours du rayon lumineux égal à 1 seconde mais il sera plus long. La théorie de la relativité restreinte appliquée à notre cas (Vitesse du satellite $\approx 14\,000$ km/h), donne un retard de l'horloge atomique embarquée de 7,1 microsecondes par jour sur l'horloge atomique terrestre.

II) La relativité générale

A cette correction s'ajoute une autre correction plus subtile liée à la gravitation. En effet, la gravité ressentie par l'horloge dans le satellite n'est pas la même que la gravité terrestre. C'est donc lié à la théorie de la relativité générale qui nous dit que deux horloges atomiques identiques soumises à une gravité différente ne battent pas au même rythme. Une manière de comprendre ce phénomène est de considérer un photon dans un champ de gravité. Le photon est dépourvu de masse, mais doté d'une énergie proportionnelle à la fréquence de l'onde électromagnétique associée. Or la célèbre formule d'Einstein, $E = mc^2$ qui établit une équivalence entre énergie et masse, indique que le photon n'est pas insensible à un champ gravitationnel. Par conséquent, en perdant de l'altitude dans un champ gravitationnel un photon gagne de l'énergie et donc augmente sa fréquence. Comme les horloges atomiques mesurent le temps en prenant comme référence la fréquence de transition des éléments de l'horloge atomique, on a donc un décalage entre les horloges des satellites et celles sur terre. Le raisonnement énoncé précédemment est assez approximatif mais il donne une bonne idée du phénomène. Le calcul exact montre que l'horloge atomique du satellite avance de 45,7 microsecondes par jour.

Si on combine les deux corrections relativistes, on obtient un décalage de 38,6 microsecondes. Ce qui donne une imprécision :

$$\mathbf{38,6. 10^{-6} s . 299\,792,458\ km/s = 11\ km\ par\ jour}$$

En fait, les horloges qui vont être satellisées sont construites pour retarder de 38,6 μ s par jour lorsqu'elles sont immobiles au niveau de la mer.

A ces deux corrections relativistes s'ajoutent divers corrections classiques que les calculateurs des récepteurs corrigent directement:

- Influence de l'ionosphère et de l'atmosphère.
- Imperfections des horloges.
- Trajectoires des satellites légèrement elliptiques.
- Influence de la rotation de la terre sur les mouvements relatifs.
- ...

5) Les différentes applications possibles du système de positionnement par Satellite.

Le domaine d'application du système GPS ou du système Galileo est très vaste. Il touche, on s'en doute, les transports mais aussi l'agriculture, les télécommunications, l'environnement, la pêche, la sécurité... Voici un bref aperçu de quelques domaines.

a) Les Transports :

La principale application d'un système de navigation par route est d'apporter des facilités aux moyens de transports. Quelque soit le domaine de transport (par air, mers, routes, par rails). Chacun de ceux-ci ont des besoins qui leurs sont propres.

I) Par route.

Le problème actuel des moyens de transports par route sont sans conteste les bouchons. Ceux-ci entraînent des coûts supplémentaires pour les sociétés de transport par route. Un utilisateur de Galileo pourra recevoir à chaque instant des informations sur les conditions de circulation, sur le chemin le plus rapide où le plus court. Combiné à un traitement informatique, ces informations permettront de trouver de manière optimale le meilleur trajet et aussi d'avoir une optimisation du trafic.

II) Dans l'air.

La gestion du trafic aérien joue un rôle considérable dans la sécurité aérienne et dans la vitesse des trajets. Dans l'avion, le système Galileo pourra être utilisé dans les différentes phases du vol, c'est-à-dire suivre la bonne route aérienne sans dévier de sa trajectoire, la phase d'approche, l'atterrissage, et la gestion au sol de l'avion. En résumé, Galileo rendra le contrôle aérien plus facile et plus sur.

III) En mer.

Les accidents en mer sont fréquents et dans 80% des cas, ces accidents sont dus à un erreur humaine. Grâce à Galileo, les marins auront une information précise et continue sur la position du bateau et sa route. Il permettra aussi de guider le bateau dans certains passages difficiles comme l'approche du port d'Anvers réputée très difficile.

IV) Sur les rails.

L'application que l'on peut souligner dans le domaine du transport par rail, et celle qui consiste à réduire les distances entre deux trains et donc d'augmenter la fréquence de ceux-ci. Il permettra aussi de localiser précisément chaque train.

b) En agriculture :

L'utilisation d'un système de positionnement par satellite peu paraître bizarre en agriculture mais, ces systèmes sont déjà couramment utilisés. En effet, les récepteurs sont déjà intégrés dans les moissonneuses-batteuses et dans les pulvérisateurs. Dans le premier cas, c'est principalement pour cartographier le rendement d'une terre et dans l'autre pour rendre la pulvérisation plus précise et mieux contrôlée, ce qui est beaucoup plus bénéfique à l'environnement. Quel est l'intérêt de connaître le rendement d'une terre ? Tout simplement, le fermier peut mieux adapter son épandage d'engrais ou de pesticides pour ainsi augmenter sa production.

c) La pêche.

Les pêcheurs pourront localiser leur(s) bateau(x) avec une grande précision pour assurer leur sécurité face aux dangers de la mer (intempéries ou collision) et augmenter la productivité de leurs activités de pêche.

d) En matière de sécurité :

La sécurité est un des thèmes qui a une grande importance aux yeux des investigateurs du projet Galileo. Il est donc logique que les applications soient assez nombreuses, c'est pourquoi voici un bref aperçu de celles-ci.

I) Sécurité routière.

En ouvrant son journal à la page faits divers, nous découvrons plusieurs accidents de la route. Le système Galileo pourra, une fois entré en service, offrir plus de sécurité aux usagers de la route. Galileo fournira de nouvelles possibilités aux automobilistes dans les domaines suivants :

- Navigation et guidage enrichi d'information sur les dangers de la route où se trouve l'automobiliste (virages dangereux,...). Mais aussi des informations dynamiques des dangers (routes verglacées, accidents sur telles routes,...).
- En cas d'accidents, transmission automatique des informations essentielles sur la station d'urgence la plus proche.
- Galileo va accroître l'efficacité des services de secours.
- Il permettra aussi de limiter la vitesse des automobilistes dans certaines portions de route.
- Etc...

Ces applications peuvent déjà être mises au point avec le GPS mais Galileo a un avantage important sur son « concurrent », c'est que le système européen garantit un signal continu, et un signal disponible dans les villes et dans les tunnels alors que son homologue américain en est incapable.

II) Prise en main des urgences et des incidents

Lors d'un accident de voiture, certaines voitures ont la possibilité de communiquer directement la position exacte de l'accident aux services de secours. Avec Galileo ce transfert d'information sera toujours possible grâce au service **de sûreté de la vie** qui garantit un signal continu et sécurisé. En plus, les signaux pourront être captés dans les tunnels et dans la ville, ce qui n'était pas toujours possible dans le passé.

En absence de centrale d'appel, les informations pourront être directement transférées dans l'ambulance ou dans le camion de pompiers. D'où un gain de temps.

Dans un futur proche, dans le cas d'un accident qui implique un transport de produits dangereux, les informations sur la cargaison pourront directement être communiquées aux services de secours.

III) Sécurité dans le transfert de données cryptées.

Un directeur de société à Paris veut envoyer des informations confidentielles à un de ses employés dans son bureau à Bruxelles. Le directeur connaît les coordonnées géographiques du bureau de son employé. Dans le mail crypté, le directeur encode les coordonnées et envoie le mail. L'employeur a sur son ordinateur un récepteur Galileo qui localise le pc. Si le pc est dans un rayon proche des coordonnées encodées avec le mail, l'employé peut ouvrir le mail, par contre si il n'est pas au bon endroit impossible de lire le mail.

6) Conclusion.

Le système Galileo est à l'aube de sa vie et montre déjà des énormes qualités et possibilités d'application, avec un gros avantage sur ses concurrents c'est qu'il sera géré par une entreprise civile, contrairement à son homologue américain. Il permettra de rendre les applications plus efficaces et plus sécurisées. Mais sans Einstein tout cela n'aurait jamais été réalisable. Je crois que nous pouvons affirmer qu'Einstein a marqué de son empreinte le XX^{ème} siècle.

Dans tous les cas, le projet Galileo portera très haut les couleurs de l'Europe dans le monde.

7) Bibliographie.

« Du GPS au DVD », P. YAM, dans *Pour la Science* édition spéciale Einstein, décembre 2004, pages 40 – 43.

« Connaître sa position, un problème de relativité », J-M COURTY – E. KIERLIK, dans *Pour la Science* édition spéciale Einstein, décembre 2004, pages 45 – 48.

« La révolution Galileo », J-M BIAIS, dans *Le Vif/L'Express* du 6/01/06

<http://www.obs-besancon.fr/tf/equipes/vernotte/echelles/node6.html>

<http://fr.wikipedia.org/>

http://europa.eu.int/comm/dgs/energy_transport/galileo/index_fr.htm

http://www.cnes.fr/html/_112_860_.php

<http://www.futura-sciences.com/>

<http://www.esa.com/>