

Le GPS et la physique

Henri-Pierre Garnir, David Strivay et Thierry Bastin

Université de Liège, I.P.N.A.S.
Sart-Tilman B15, B4000, Liège, Belgique
hpgarnir@ulg.ac.be

1.- INTRODUCTION

Ne vous êtes vous jamais égaré, avez-vous du mal à trouver votre direction, à mémoriser le chemin qui conduit vers le petit coin du monde qui vous plaît bien, ou tout simplement, à retrouver l'endroit où vous avez laissé votre voiture? Avec un GPS plus besoin de demander votre route, l'électronique vient à votre aide pour vous permettre de repérer votre position avec une précision phénoménale et vous conduire vers n'importe quelle destination! Cette technologie merveilleuse peut apparaître un peu magique. Nous allons donc essayer de vous expliquer comment elle fonctionne et vous devriez vous rendre compte que, finalement, le principe du GPS est assez simple, même si son fonctionnement implique une bonne dose de calculs et qu'il repose sur de la "belle" physique.

2.- LE SYSTEME GPS DE RADIO NAVIGATION PAR SATELLITES

Le GPS (Global Positioning System) permet de mesurer avec précision sa position partout sur la terre tant au sol que dans les airs. Il s'agit d'un système récent (1990) et très complexe conçu originalement par l'armée américaine pour son usage propre. Cependant, depuis 1995, il est aussi accessible aux civils de tous les pays (mais avec des limitations). Dès son arrivée, le GPS a révolutionné la navigation tant terrestre qu'aérienne. Il existe maintenant des récepteurs GPS portables performants et bon marché (<200€) que nous pouvons tous utiliser. D'ici peu, on intégrera des récepteurs GPS dans divers objets comme les montres ou les téléphones cellulaires (GSM). Il s'agit donc d'une technologie nouvelle et utile. *La radio navigation par satellites représente une invention aussi importante que celle de la montre: de même*

qu'aujourd'hui personne ne peut ignorer l'heure, personne à l'avenir ne pourra se passer de connaître l'endroit exact où il se trouve¹.

Ce que l'on sait moins, c'est que la radio navigation par satellites repose sur des principes physiques très élaborés mettant en oeuvre tant la mécanique quantique que la relativité générale. Il s'agit d'une application concrète du concept d'espace-temps introduit par Einstein et elle ne pourrait fonctionner sans prendre en compte les corrections relativistes et les principes de physique moderne qui régissent le fonctionnement des horloges atomiques ultra-précises.

Nous allons donc décrire succinctement le fonctionnement du GPS américain et donner quelques pistes qui peuvent vous permettre d'approfondir le sujet en consultant d'autres documents comme par exemple des sites internet spécialisés.

3.- STRUCTURE DU SYSTEME GPS

Le GPS repose sur trois piliers ou "segments" :

- le segment spatial,
- le segment de contrôle,
- le segment utilisateur.

Les deux premiers sont financés par le département américain de défense, tandis que le troisième, constitué par les récepteurs GPS disséminés dans le monde, est disponibles pour le grand public.

Le segment spatial comprend au minimum 24 satellites² situés sur des orbites à 20.200 km d'altitude (par rapport à la surface de la terre). Ils sont répartis par groupe de quatre sur 6 plans inclinés à 55° par rapport à l'équateur et différents de 60° entre eux. La période de révolution est de plus ou moins 12h, chaque satellite repasse donc deux fois par jour au même endroit et, à tout moment, au moins 4 satellites devraient être simultanément visibles depuis n'importe quel point de la terre.

Chaque satellite émet en permanence des signaux codés qui peuvent être reçus sur terre. L'intensité des émissions étant relativement faible ($\approx 3 \cdot 10^{-14} \text{ W/m}^2$), l'antenne du récepteur doit être placée dans un lieu dégagé de façon à recevoir directement les signaux et à éviter les réflexions.

Les signaux des satellites, qui sont émis sur une fréquence unique et commune de

¹ Note d'information de la commission européenne - Galileo

² En pratique, on compte environ 30 satellites GPS en l'air, les nouveaux, de plus en plus performants, remplaçant progressivement les anciens lorsqu'ils sont décommissionnés.

1575.42 Mhz, donnent en permanence la référence du satellite, l'heure (obtenue depuis les horloges embarquées) et des informations qui permettent de retrouver la position exacte du satellite lors de l'émission de tops de synchronisation.

Le segment de contrôle est constitué de tout l'équipement terrestre qui assure le suivi et l'entretien des satellites en orbite. La station principale est située au Colorado (Falcon Air Force Base). Elle est relayée par 4 stations secondaires réparties sur des petites îles contrôlées par les USA (Hawaii, Ascension, Diego Garcia et Kwajalein). Il s'agit de s'assurer que tous les satellites fonctionnent bien, de corriger les trajectoires pour que les informations de position soient les plus correctes possibles et de synchroniser toutes les horloges des satellites, tant entre elles qu'avec l'heure de la terre.

Le segment utilisateur est constitué par tous les récepteurs GPS répartis dans le monde. Ces appareils sont capables de recevoir et d'analyser les données transmises par les satellites et fournissent au minimum les informations de temps, de position et de vitesse. Notons cependant que la plupart des GPS modernes disposent de logiciels puissants fournissant des fonctionnalités supplémentaires.

4.- PRINCIPES DE FONCTIONNEMENT

4.1.- Calcul de la position

Un récepteur GPS contient une horloge qui peut être synchronisée selon le processus d'initialisation décrit plus loin. Dès que l'horloge est "à l'heure", le récepteur peut mesurer les temps que mettent les signaux issus des différents satellites pour l'atteindre. Ces temps sont convertis en distances (en multipliant par la vitesse de la lumière et en effectuant certaines corrections). Les trajectoires de tous les satellites étant parfaitement prédictibles, il est possible, par calcul, de connaître les positions exactes des émetteurs à n'importe quel moment. En rassemblant toutes ces données et par triangulation, le récepteur calcule alors sa position et l'affiche en continu.

Pour obtenir une résolution de l'ordre du mètre, l'horloge doit être exacte à 1 à 2 ns (10^{-9} s) près et les calculs des trajectoires doivent se faire à l'ordre de la fraction de mètre!

4.2.- Callage de l'horloge

Lors de la première mise en marche du récepteur GPS dans une région donnée, il faut souvent plusieurs minutes pour obtenir la première indication fiable. C'est le temps qu'il faut pour que les informations soient remises à jour dans le récepteur et pour "caller" l'horloge.

Le principe est le suivant. Le récepteur se met à l'écoute de la fréquence des satellites et recueille le maximum d'informations sur les conditions du système, les trajectoires des satellites actifs et l'état de l'ionosphère. Ceci se fait à faible vitesse de transmission (50 bauds) et le cycle complet est répété toutes les 12,5 minutes. En même temps qu'il enregistre toutes ces informations, le récepteur détecte les tops de synchronisation émis par chaque satellite et commence ses calculs. Son horloge n'étant probablement pas à l'heure, les informations doivent être recoupées comme suit.

Soit d_1 et d_2 les distances estimées à un instant donné par rapport à deux satellites connus. Ces valeurs sont obtenues en faisant³ :

$$d_1 = c (t_1 - t)$$

$$d_2 = c (t_2 - t)$$

c : vitesse de la lumière ; t : horloge du récepteur ; t_1 et t_2 horloges des satellites.

Comme t n'est pas très correct, on peut l'éliminer et on a :

$$d_1 - d_2 = c (t_1 - t_2)$$

Donc le récepteur se trouve sur une surface qui est le lieu géométrique des points dont la différence des distances à deux points fixes est constante. Il s'agit d'un hyperboloïde de révolution dont les deux satellites sont les foyers. En refaisant le même calcul avec un troisième satellite on définit un second hyperboloïde. On sait alors que l'on est sur la courbe d'intersection de ces surfaces. Un quatrième satellite est nécessaire pour définir une seconde courbe, non dégénérée avec la première, qui donnera un point unique d'intersection qui sera la position cherchée (en effet, avec trois satellites, on observe une dégénérescence du système). A partir de ces informations, l'horloge interne du récepteur sera synchronisée avec précision et les calculs se simplifient fortement de telle sorte que la position peut être calculée en temps réel plusieurs fois par seconde et affichée sur l'écran du récepteur (notons que

³ En pratique, c'est plus compliqué car le calcul tient compte de certaines corrections dues à l'ionosphère, la troposphère et à la position du satellite sur l'horizon.

celui-ci continue bien sûr à vérifier et corriger ses calculs en prenant en compte les données nouvelles transmises en permanence depuis les satellites).

4.3.- Calcul de la vitesse

Pour évaluer sa vitesse instantanée de déplacement, le récepteur joue sur un autre concept : l'effet Doppler. En effet, lorsque le récepteur se déplace, même lentement, un léger déphasage se manifeste entre le signal calculé et le signal reçu. Cet effet, qui vient en superposition de la vitesse relative (mais calculable) des satellites qui parcourent leur trajectoire à plus de 3.88 km/s, est faible mais néanmoins suffisant pour calculer la vitesse instantanée du récepteur par rapport à la terre.

Un récepteur GPS est donc une merveille de technologie qui utilise pleinement les ressources de la micro-informatique pour résoudre rapidement des problèmes numériques très complexes. Les algorithmes et les techniques très sophistiquées d'encodage et de synchronisation qui sont mises en oeuvre sont décrites en détails dans des documents techniques qui sont disponibles, par exemple, sur l'Internet, et peuvent être consultés aisément (même si leur compréhension est fastidieuse). Nous n'irons donc pas plus loin dans ces explications. (Quelques références sont données en fin de texte.)

5.- LA PHYSIQUE DU GPS

Pour un scientifique, il peut être intéressant de se pencher sur les principes de physique qui permettent d'atteindre une telle précision. Nous nous trouvons en effet en présence d'instruments très précis qui se déplacent à grandes vitesses, les influences relativistes sont donc parfaitement observables. De plus, réaliser et synchroniser des horloges avec une précision de l'ordre de la fraction de nanoseconde (10^{-10} s) implique des technologies très spéciales que nous allons évoquer ci-après.

5.1.- Les effets relativistes

Tout le système GPS repose sur le second postulat de la relativité restreinte, à savoir l'invariance de la vitesse de la lumière dans le vide. Cependant, diverses corrections

doivent être prises en compte pour s'assurer que la fréquence des horloges soit perçue correctement sur terre.

5.1.1.- Dilatation du temps

La dilatation du temps, due à la vitesse des horloges embarquées, réduit les fréquences d'un facteur :

$$\Delta f/f = (v/2c)^2$$

Les horloges ont des vitesses de l'ordre de 4 km/s et $\Delta f/f$ est de l'ordre de 10^{-10} . Cela correspond à une erreur de ≈ 0.1 ns par seconde qui se traduirait par une dérive de l'ordre d'une dizaine de mètres après 5 minutes!

5.1.2.- Le "blueshift" gravitationnel

Un photon qui "tombe" vers la terre voit son énergie augmenter. Comme sa vitesse est fixée, ceci se traduit par une légère augmentation de sa fréquence (c'est le déplacement vers le bleu - blueshift) :

$$\Delta f/f = \Delta\Omega / c^2$$

où $\Delta\Omega$ est la variation du potentiel gravifique entre les horloges. Dans notre cas, cette correction fait que les horloges du sol sont $\approx 5 \cdot 10^{-10}$ plus lentes. De nouveau, sans introduire cet effet, le GPS dériverait rapidement!

5.1.3.- L'effet Sagnac

Toutes les horloges terrestres sont entraînées par la rotation de la terre mais à des vitesses différentes en fonction de leur latitude (de 465m/s à l'équateur à 0 aux pôles). En fait, les trajets des ondes entre les satellites et les récepteurs sont donc des spirales par rapport au référentiel (non inertiel) que constitue notre terre. L'effet sur le GPS est subtil mais non négligeable⁴. ([ref](#))

5.1.4.- Les corrections du troisième ordre

En prévision des futures avancées technologiques, des théoriciens ont déjà calculé les corrections relativistes au troisième ordre (en $1/c^3$). Elles devront être prises en compte pour des précisions relatives de l'ordre de 10^{-17} . Ils ont aussi estimé que le quatrième ordre⁵ induirait des corrections de l'ordre de 10^{-20} ! ([ref](#)).

Comme on le voit, la théorie de la relativité générale est indispensable à la bonne compréhension des phénomènes mis en jeu dans la navigation par satellites. Le GPS constitue un magnifique banc d'essai pour cette théorie et démontre bien, s'il en était

⁴ <http://mathpages.com/rr/s2-07:2-07.htm>

⁵ <http://www.edpsciences.org/articles/aa/abs/2001/16/aa10424/aa10424.html>

encore besoin, que la véracité de cette théorie ne peut plus être mise en doute.

5.2.- Les horloges

La problématique des horloges est très importante dans les systèmes de navigation par satellites puisque tout repose sur des mesures de différences de temps qui impliquent une parfaite synchronisation des émetteurs. Toutes les ressources de la physique atomique et de la technologie de pointe sont mises à contribution pour garantir les meilleurs résultats.

Les meilleures horloges actuelles sont “atomiques” et utilisent des atomes froids.

5.2.1.- *Le principe de l'horloge atomique*

Une horloge atomique se synchronise sur la fréquence de résonance d'une transition d'un atome. La fréquence de référence habituellement choisie correspond à la transition hyperfine $F=4 \rightarrow F=3$ du niveau fondamental de l'isotope 133 du césium neutre. Cette fréquence est fixée à la valeur de 9 192 631 770 Hz et est à la base de la définition moderne de la seconde⁶ ([ref](#)) et du mètre⁷ ([ref](#)). En pratique, la réalisation d'une horloge atomique implique la mise en oeuvre d'une technologie assez complexe qui repose sur une électronique sophistiquée couplée à une cavité résonante très particulière (dite de Ramsey - prix Nobel en 1989⁸ ([ref](#))).

Pour la petite histoire, il faut savoir que l'une des premières horloges atomiques⁹ fut présentée en première mondiale dans le pavillon Suisse de l'Expo Universelle de Bruxelles en 1958. Elle variait de moins de 10^{-3} s/jour. L'Observatoire Cantonal de Neuchâtel, qui l'avait développée, est maintenant en charge des horloges un milliard de fois plus précises qui seront destinées au projet Galileo (cf. § 6).

5.2.3.- *Limitation des horloges atomiques*

Le principe de l'horloge atomique est basé sur un concept fondamental de la mécanique quantique qui dit qu'un atome ne peut occuper que certains états d'énergie discrets (il est quantifié) et que ces énergies, en l'absence de perturbations, sont parfaitement et immuablement déterminées. Les photons absorbés ou émis lors d'une transition de l'atome qui saute entre deux niveaux déterminés ont donc toujours la même fréquence. Accorder une horloge sur l'une de ces fréquences

⁶ <http://www.obs-besancon.fr/www/tf/equipes/vernotte/echelles/node7.html>

⁷ <http://www.industrie.gouv.fr/metro/aquoisert/metre.htm>

⁸ <http://www.nsf.gov/nsb/awards/bush/1995vba.htm>

⁹ Basée sur la résonance des molécules d'ammoniac dans un champ de micro-ondes, observée pour la première fois en laboratoire en 1949.

garantit donc son exactitude pour l'éternité!

Cependant, si l'on analyse ce processus d'un peu plus près, on se heurte à certaines limitations.

La plus importante est de nature fondamentale : il s'agit du principe d'incertitude d'Heisenberg. Si l'atome change d'état, cela indique un processus évolutif. L'atome n'est pas stable et son énergie ne peut être connue avec une précision infinie. Cette imprécision est liée à la durée de vie finie des niveaux. Si t est cette durée de vie, l'erreur sur la détermination de l'énergie est de l'ordre de h/t (où h est la constante de Planck). Le temps de mesure limite de façon analogue la précision des énergies (et donc des fréquences) mesurées. Pour obtenir des horloges atomiques très précises, il faut accroître autant que possible le temps de mesure et « travailler » sur des niveaux d'énergie qui ont de très longues durées de vie (c'est le cas pour les sous-niveaux hyperfins du niveau fondamental de l'atome de césium).

Une autre source d'inexactitude provient de l'élargissement Doppler. La fréquence apparente de la transition change avec la vitesse de l'émetteur. Comme la vitesse des atomes est reliée à la température (qui n'est qu'une mesure macroscopique de l'agitation thermique) et qu'il est impossible d'atteindre le "zéro absolu" (-273.15°C), il restera toujours une composante erratique de vitesse qui va dégrader la précision.

On est donc face à un dilemme, il faut allonger au maximum le temps de mesure et tenter de "refroidir" au maximum les atomes concernés. En pratique, pour mesurer la fréquence d'une transition atomique, on fait interagir l'atome avec une onde électromagnétique dans une cavité. L'ensemble est appelé «résonateur». Les horloges atomiques traditionnelles font passer un flux d'atomes au travers du résonateur et le temps de mesure est déterminé par la vitesse du flux et les dimensions de la cavité. L'idéal est de travailler avec des cavités de grandes dimensions pour allonger le temps de mesure. Cela pose toutefois des problèmes techniques importants. Le physicien Ramsey a apporté une réponse à ces problèmes en montrant qu'une seule grande cavité peut être remplacée avantageusement par 2 petites cavités séparées par un espace vide. La précision de la mesure est dans ce cas uniquement limitée par le temps de vol des atomes entre les 2 cavités. Cela limite les problèmes techniques et permet d'atteindre des précisions de l'ordre de 10^{-13} . Les cavités dites de Ramsey ont valu à cet auteur le prix Nobel en 1989. Dans la pratique, les horloges atomiques commerciales utilisent 2 cavités séparées par une distance de l'ordre de la dizaine de cm. Pour les horloges de laboratoire, cette distance est de l'ordre du mètre.

Le gardien du temps américain (le Naval research lab.¹⁰) ([ref](#)) dispose ainsi, dans une chambre forte près de Washington DC, d'une cinquantaine d'horloges atomiques qui constituent le "garde temps" de référence des USA. Cet ensemble est évidemment couplé avec d'autres centres de références pour former un réseau international d'horloges qui se synchronisent mutuellement et en permanence (notamment au travers du système GPS).

5.2.4.- Les horloges à fontaine d'atomes froids

Récemment une nouvelle approche vient cependant d'être suivie, il s'agit des horloges à fontaine d'atomes. Leur fonctionnement repose sur les pièges à atomes récemment développés dans le cadre de la physique atomique fondamentale. Un piège est un instrument qui permet de maintenir quasi à l'arrêt et dans un tout petit volume un ou plusieurs atomes. Le principe de fonctionnement de ces pièges est relativement simple et repose sur le mécanisme de la mélasse optique.

Un atome qui absorbe un photon subit un choc qui modifie sa vitesse. Si tous les photons ont la même direction (faisceau laser par exemple) la vitesse de l'atome dans la direction du faisceau va diminuer sous la myriade d'impacts, tous dans la même direction, qu'il va subir. Cependant l'atome ne "voit" le photon que si la condition de résonance est satisfaite : il faut que l'énergie du photon coïncide *exactement* avec l'énergie d'une transition permise de l'atome. Si l'on tient compte de l'effet Doppler, cette condition n'est remplie que pour les atomes qui ont la "bonne" vitesse. Toute l'astuce du freinage par laser consiste donc à utiliser une fréquence légèrement inférieure à la fréquence de résonance. Tous les atomes qui se déplacent vers le laser absorbent facilement les photons et sont ralentis. En utilisant plusieurs faisceaux (en pratique 6) montés dans des directions différentes (sur 3 axes orthogonaux), on arrive à coincer les atomes dans un petit volume. Dans ce volume les déplacements des atomes deviennent extrêmement limités et erratiques. Ils sont en quelque sorte englués par les faisceaux lasers dans une sorte de "mélasse optique". Grâce à cette technologie (qui a fait l'objet du prix Nobel de 1997¹¹ [ref](#)) on obtient des atomes "froids".

La nouvelle génération d'horloges atomiques utilise cette technologie comme point de départ. Après avoir piégé un certain nombre d'atomes (par exemple de Cs) dans un petit volume, on augmente brutalement la fréquence du laser inférieur et on diminue celle du laser supérieur. On induit de la sorte un déplacement vertical des

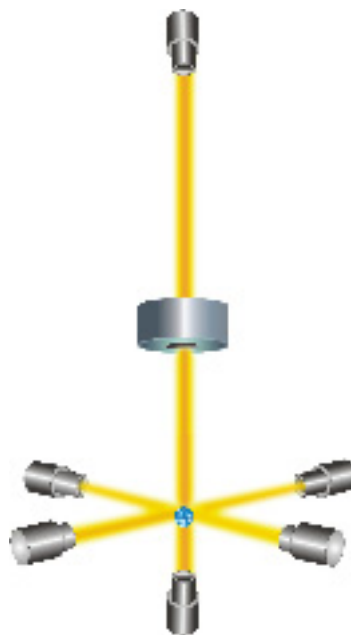
¹⁰ <http://tycho.usno.navy.mil/time.html>

¹¹ <http://www.nobel.se/physics/laureates/1997/index.html>

atomes à une vitesse bien déterminée. On éteint ensuite tous les lasers et le paquet d'atomes se met en mouvement ascendant. Comme dans une fontaine, les atomes vont monter puis redescendre sous l'influence de la pesanteur. En pratique la hauteur atteinte par le jet est gouvernée par les mêmes relations que celles qui prévalent pour un ballon lancé en l'air. La hauteur maximale est limitée à quelques décimètres par des considérations techniques.

Pour synchroniser l'horloge, on fait passer ces atomes dans une cavité résonante. Lors de la montée, ils subissent la première interaction et, lors de leur chute, la seconde (cf. résonateur de Ramsey). Le temps d'interaction, qui correspond à la durée du trajet aller-retour, est de l'ordre de la seconde et le même pour tous les atomes puisque la mélasse optique (et d'autres phénomènes plus subtils¹²) avait réduit l'agitation thermique du paquet à une température équivalente de moins de 2 micro K.

Dans le résonateur, on a donc un déplacement très lent de particules froides (vitesses de l'ordre du m/s), ce qui améliore la précision du processus. Il existe actuellement quelques prototypes de ces horloges (au NIST¹³ ([ref](#)), à Paris, à Besançon et à Neuchâtel par exemple). Les précisions atteintes sont de l'ordre de 10^{-15} pendant des durées de quelques heures.



Principe du piège à atomes et de la mélasse optique (Document NIST)

Si ces horloges avaient été mises en marche il y a 20 millions d'années, elles auraient

¹² Tels que le mécanisme de refroidissement Sisyphe. Voir par exemple ([ref](#)) :

<http://www.lkb.ens.fr/recherche/atfroids/tutorial/index2.htm>

¹³ http://www.nist.gov/public_affairs/releases/clockworks.htm

dévié de moins d'une seconde...

Mais ces dispositifs restent néanmoins très complexes et nécessitent, pour battre la seconde, une chaîne de changements de fréquences qui complique leur mise en oeuvre. Une découverte récente va peut-être bouleverser tout cela : il s'agit des horloges à fréquence optique.

5.2.5.- Les horloges à fréquence optique

Jusqu'il y a peu, les horloges atomiques étaient cantonnées à des transitions ayant des fréquences dans la gamme des micro-ondes. Cette limitation était principalement d'ordre technique: il faut en effet passer des hyper-fréquences vers des fréquences plus "classiques" (de l'ordre du MHz) pour fournir un signal stable, utilisable par d'autres instruments. Pour obtenir un signal à 10 Mhz à partir d'une horloge à Cs, il faut diviser la fréquence du résonateur par un facteur 919,263... ce qui est loin d'être trivial. La "chaîne de fréquences" qui réalise cette opération est délicate à mettre en oeuvre car elle implique plusieurs oscillateurs secondaires qui doivent tous être en parfaite synchronisation. Ceci n'était techniquement possible que pour des fréquences inférieures à quelques GHz.

Très récemment (2000 [Counting the Ripples in a Light Wave](#).¹⁴) une nouvelle technologie a vu le jour et ouvre de nouvelles perspectives. Il s'agit des peignes optiques ("optical comb"). Cette technologie permet de synchroniser une fréquence optique (de quelques centaines de Tera Hertz (10^{12} Hz)) avec une fréquence "classique" de quelques MHz.

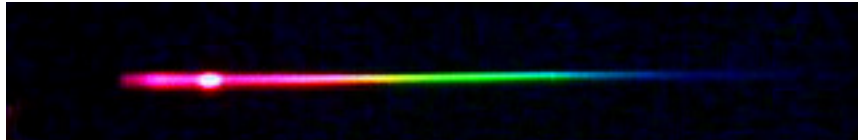
Le principe est le suivant. Un laser de haute précision génère, à une fréquence d'une centaine de Mhz, des impulsions extrêmement brèves (de l'ordre de la femtoseconde - 10^{-15} s). Notons que ces impulsions ont des dimensions de l'ordre de quelques microns et ressemblent plus à des boules de photons qu'à un train d'ondes ; ce sont des concentrés d'énergie dans un petit volume. Elles sont envoyées dans une fibre optique très spéciale qui réagit en générant les harmoniques de la fréquence de répétition des pulses dans une gamme de fréquences très étendue. Cette fibre, ([photonic crystal fiber](#)¹⁵), récemment mise au point¹⁶ (1999 [ref](#)), est en fait un milieu optique fortement non linéaire qui réagit aux chocs des pulses en générant beaucoup d'harmoniques. Mais, contrairement aux cristaux biréfringents utilisés dans les multiplicateurs de fréquence classiques, cette fibre possède la *même* vitesse de groupe pour une très large gamme de fréquences. Le pulse se propage donc sans trop de dispersion et le signal qui émane de la fibre est une superposition d'harmoniques sur

¹⁴ <http://focus.aps.org/v5/st24.html>

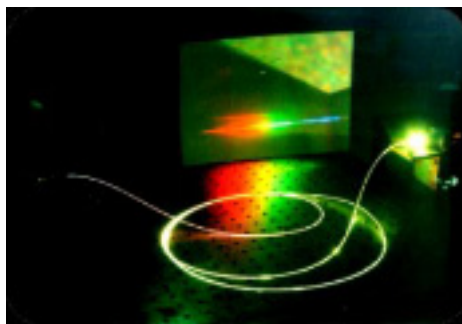
¹⁵ <http://www.mpq.mpg.de/~haensch/chain/pcf.html>

¹⁶ <http://www.bath.ac.uk/physics/groups/opto/rse/holeyfibres.html>

une large gamme de fréquences qui peut couvrir tout le spectre visible et s'étendre sur 2 ou 3 octaves. Le spectre en fréquence de ce signal a l'aspect d'un peigne (comb) dont les dents sont équidistantes et séparées par la fréquence de répétition du laser (cf. transformée de Fourier de la fonction peigne de delta). On appelle ce phénomène un "supercontinuum"¹⁷ (ref).



Le supercontinuum produit dans une fibre optique spéciale



Un supercontinuum projeté sur un écran (Documents Univ. Bath)

On utilise ce signal comme une "règle" pour mesurer n'importe quelle fréquence. On obtient une première estimation grossière de la fréquence inconnue en comptant le nombre de "graduations" du peigne qui séparent la fréquence inconnue de sa seconde harmonique (générée par exemple dans un cristal classique). On raffine ensuite cette valeur en analysant le battement produit entre la fréquence inconnue et l'harmonique du peigne qui en est la plus proche. On obtient ainsi la valeur exacte du rapport entre la fréquence inconnue et celle des impulsions du laser. On a donc l'équivalent d'une "chaîne de fréquences" qui relie les fréquences visibles et les fréquences radio¹⁸ (ref).

Si l'on utilise comme source une diode laser pompant un laser état-solide travaillant en "mode locking"¹⁹ (ref) couplé avec la fameuse fibre, tout le dispositif et son électronique pourront tenir dans un volume de la taille d'une boîte à chaussures.

Grâce à cette technologie, il est maintenant possible d'utiliser une transition optique d'un atome ou d'un ion pour construire une horloge.

¹⁷ http://www.imm.dtu.dk/undervisning/phdschool/calendar2001/Workshop_NPC/Coen.html

¹⁸ <http://www.physicstoday.org/pt/vol-54/iss-3/p37.html>

¹⁹ <http://www.bath.ac.uk/physics/groups/opto/rse/pulsedlasers.html>

A l'institut Max Planck de Garching, le [groupe de Walther²⁰](#) développe actuellement une horloge utilisant une transition à 236.5 nm (dans l'ultra-violet) de l'indium une fois ionisé. Un seul ion est piégé dans une trappe miniature et sert de "résonateur". Ils espèrent atteindre une précision de 10^{-18} s. Le laboratoire anglais de référence ([NPL²¹](#)) a, lui, choisi une transition interdite de l'ion ytterbium à 467 nm (durée de vie de l'ordre de 10 ans). Ils espèrent pouvoir mesurer sa fréquence avec une résolution de moins de 1 Hz²² ([ref](#)).

Reste à garantir que le laser utilisé ait une résolution au moins équivalente, ce qui implique que sa cavité ait une stabilité mécanique phénoménale²³ (variations inférieures à l'épaisseur d'un atome) ([ref](#)).

Quelques sites intéressants :

[Description du GPS \(en français\)](#) ²⁴

[le GPS \(overview us\)](#) ²⁵

<http://www.colorado.edu/geography/gcraft/notes/gps/gps.html>

<http://tycho.usno.navy.mil/time.html>

<http://www.aip.org/pt/vol-55/iss-5/current.html>

Le manuel d'introduction au récepteurs GPS de Garmin²⁶ ([ref](#))

6.- LE PROJET EUROPEEN GALILEO

L'Union européenne a décidé en 2001 de démarrer la phase de développement de son programme **Galileo** de radionavigation par satellites^{27,28} ([ref](#) [ref](#)). Ce système sera comparable au système américain mais est bien sûr d'inspiration civile. Il permettra d'assurer notre indépendance technologique vis-à-vis des Etats-Unis et brisera le monopole de fait de l'industrie américaine. Son coût estimé est de 3.2 milliards € (soit l'équivalent de 150 km d'autoroutes!).

Ce programme, dont la phase de définition s'est achevée en 2001, deviendra

²⁰ <http://www.mpg.de/Indium.html>

²¹ http://www.npl.co.uk/length/wss/projectintros/odd_yb_project.html

²² <http://www.npl.co.uk/length/wss/projectintros/poster/>

²³ <http://www.physicstoday.org/pt/vol-54/iss-3/p37.html>

²⁴ <http://www.univ-lemans.fr/~s962665/gps.html>

²⁵ <http://www.colorado.edu/geography/gcraft/notes/gps/gps.html>

²⁶ <http://www.garmin.com/aboutGPS/manual.html>

²⁷ http://www.europa.eu.int/comm/energy_transport/en/gal_en.html

²⁸ http://www.esa.int/export/esaSA/ESAGFEF18ZC_index_0.html

opérationnel en 2008. Il reposera sur un ensemble de 30 satellites orbitant à 24000 km de la terre. Quelques améliorations techniques le rendront plus performant que le GPS actuel mais, suite aux craintes des USA de voir le système européen interférer avec le leur, les fréquences et codages adoptés pour Galileo doivent être incompatibles avec celles du GPS. Ceci impliquera donc malheureusement de nouveaux équipements de réception.

Pour être complet, il faut aussi mentionner que l'URSS avait, en son temps, développé un système militaire spécifique (GLONASS - GLObal NAVigation Satellite System) techniquement très inférieur au système américain. La Russie, qui en a hérité, semble ne plus l'entretenir et l'avenir de GLONASS, qui devient de moins en moins fiable, est très incertain²⁹ ([ref](#)).

Notons aussi que l'Amérique n'est pas en reste et est en train d'améliorer son système par le WAAS (Wide Area Augmentation System³⁰ - [ref](#)) qui donnera une précision "garantie" de moins de 7m.

7.- COMMENT CHOISIR SON GPS

Tous les fabricants de GPS civils sont américains. Deux firmes se partagent la quasi totalité du marché du GPS portable : Garmin³¹ ([ref](#)) et Magellan³² ([ref](#)) (maintenant membre du groupe français *Thales*). Tous les modèles récents disposent d'un récepteur à 12 canaux parallèles qui permet de suivre potentiellement 12 satellites simultanément (cependant, en pratique, il est rare que la moitié des 24 satellites soient visibles en même temps!). Ils affichent tous leur position (latitude/longitude/altitude) en divers formats et sont capables de calculer leur vitesse instantanée par rapport au sol et de donner l'heure (à ± 1 s). La précision est la même pour tous et dépend plus des conditions de réception que de l'appareil³³. Tous les GPS ont des difficultés à fonctionner en ville (blocage par les buildings) et sous les arbres (les feuilles absorbent les ondes). Ils se différencient surtout par leurs fonctionnalités annexes³⁴ ([ref](#)).

²⁹ <http://mx.iki.rssi.ru/SFCSIC/english.html>

³⁰ <http://www.gpsinformation.net/exe/waas.html>

³¹ <http://www.garmin.com/>

³² <http://www.magellangps.com/fr/index.asp>

³³ Notons qu'il existe des récepteurs plus précis (± 5 mm) mais leur usage est plus complexe et leur prix les met hors de portée de l'amateur (<http://www.ashtech.com/fr/>). ([ref](#))

³⁴ <http://www.garmin.com/aboutGPS/manual.html>

Les options les plus courantes sont :

- a.- table de “waypoints” (mémorisation de points de référence)
- b.- suivi de routes pré-programmées
- c.- mémorisation de trajets
- d.- boussole et/ou altimètre électronique(s)
- e.- mémoire pour affichage de points d’intérêts et/ou d’une carte sous-jacente
- f.- connectivité avec un ordinateur (diverses fonctions & logiciels)
- g.- antenne détachable
- h.- volume, poids, affichage, autonomie sur piles et mode d’alimentation
- i.- robustesse et étanchéité
- j.- calculateurs annexes (lever/coucher soleil & lune ; périodes de chasse/pêche etc...)
- k.- activation d’alertes (déplacement intempestif ou proximité d’un waypoint)
- l.- accepte le GPS différentiel (DGPS) et le futur système WAAS.



L’eTrex, un récepteur simple et bon marché (Document Garmin)

Le prix du récepteur dépend bien sûr de ses performances. Un modèle de base comme l’ eTrex de Garmin³⁵ ([ref](#)) (<250€) offre un bon rapport qualité/prix mais est limité dans ses possibilités d’affichage. Si vous voulez un système complet, avec affichage de cartes sous jacentes, alertes sonores, etc... les prix montent rapidement³⁶ ([ref](#)).

Les systèmes embarqués, proposés dans les voitures, sont souvent très complets. Ils

³⁵ <http://www.formar.be/FR/producten/eTrex.htm>

³⁶ <http://www.formar.be/FR/producten/spIII.htm>

comprennent souvent une centrale inertielle qui pallie l'absence temporaire de signal GPS, des systèmes de navigations avec affichage de cartes et un guidage vocal plus ou moins convivial. Leurs bases de données sont réactualisables par CD-ROM, DVD ou radio- A tester avant d'acheter!



Le StreetPilot, un GPS avec carte intégrée et antenne détachable (document Garmin)

L'option DGPS (Differential GPS) permet dans certains cas une amélioration considérable de la précision. Cette méthode consiste à corriger l'erreur issue de chaque satellite par des informations calculées par des balises au sol dont la position est parfaitement connue. Ces corrections sont transmises aux récepteurs par ondes radio distinctes. Ce système permet d'améliorer la précision dans des zones situées aux environs des balises terrestres. Il faut cependant un appareillage spécial³⁷ ([ref](#)).

Le WAAS fonctionne sur le même principe, mais les corrections sont retransmises depuis la terre vers les satellites qui les rétrocedent au récepteur. Ce système ne couvrira, dans un premier temps, que les USA.

8.- CONCLUSIONS ET AVENIR

La radio-navigation par satellites est en train de changer la façon de nous repérer sur terre. Déjà les camions, les bus (qui affichent le nom des arrêts), les bateaux et les avions sont dépendants de ces techniques. Les pilotes d'avions se fient au GPS pour établir leur route et vous avez peut-être remarqué que, dans certains aéroports, les places de parkings des avions face aux bras articulés sont repérées en latitude/longitude. Savez-vous que la *Scuderia Ferrari* utilise des GPS embarqués pour contrôler automatiquement les réglages de ses bolides de Formule 1 tout au long des circuits.

La technologie évolue, et dans un proche avenir, des puces GPS miniatures et très

³⁷ http://www.ccg-gcc.gc.ca/cen-arc/mns-snm/gps-spg_f.htm

bon marché, seront incorporées dans des objets aussi divers que des téléphones cellulaires (GSM), des montres, des ordinateurs, des véhicules, des jouets et même peut-être (sous forme de puces biocompatibles) dans notre propre corps!

On envisage par exemple de facturer l'usage des autoroutes (ou de moduler la taxe de circulation) en fonction du trajet réel d'un véhicule qui serait enregistré par GPS/GSM). Des bracelets GPS/GSM permettent de suivre les déplacements des animaux migrateurs, etc...

Si les récepteurs GPS deviennent aussi communs que les montres, le temps et l'espace seront maîtrisés. Vos rendez-vous seront définis à la fois par l'heure et le lieu. On ne pourra plus se perdre ou vous perdre. Les cartes routières deviendront aussi archaïques que les cadrans solaires.

Notons cependant que l'usage de cette technologie nous rend directement dépendant du bon vouloir de l'armée américaine. Il faut se rappeler que le GPS a été conçu dès son origine dans un but guerrier (pour guider les engins militaires et les armes dites "propres") . Tout est encore fait pour que, sur simple décision de la Maison Blanche, le système puisse être rendu inopérant dans n'importe quelle région du monde.

Pour s'émanciper et affirmer son rôle dans le monde, l'Europe se doit de promouvoir son dispositif civil complémentaire.

Il est primordial que le citoyen comprenne non seulement la physique mais aussi les enjeux liés aux techniques de navigation par satellites. Nous espérons que ce texte pourra vous y aider.

A paraître dans le bulletin de "Science et Culture", Novembre-Décembre 2002

Version interactive html en : <http://www.ulg.ac.be/ipne/garnir/gps/gps.html>
