



Premier septembre 1983 : en provenance de New York via Anchorage (Alaska) et à destination de Séoul, le vol 007 de la Korean Airlines s'écarte de sa trajectoire. Le réglage incorrect du pilote automatique échappe à la vigilance de l'équipage et le Boeing 747 pénètre dans l'espace aérien soviétique. Repéré par les radars et pris en chasse par des appareils militaires il est, selon la version la plus vraisemblable, confondu avec un avion espion américain qui vole dans la même zone, de grande importance stratégique. L'appareil est abattu et ses 269 occupants trouvent la mort au large de l'île de Sakhaline. Suite à cette tragédie qui marque un renforcement très net de la guerre froide, le président américain Ronald Reagan annonce que le « GPS », alors encore en développement, sera accessible aux civils (et donc aux avions de ligne) une fois opérationnel. Ironie de l'Histoire, c'est donc une page sombre du XX<sup>e</sup> siècle qui est à l'origine du transfert vers le grand public de cette technologie militaire.

La mise au point du GPS est l'aboutissement de plusieurs décennies de recherche. En effet, les premiers systèmes de guidage des avions par ondes radio depuis le sol apparaissent lors de la seconde guerre mondiale. En 1957, des scientifiques américains sont chargés de surveiller les transmissions radio de Spoutnik, le premier satellite artificiel lancé par l'URSS le 4 octobre de cette même année. Ils découvrent alors que les variations du signal émis par l'engin spatial (et plus particulièrement la modification de la fréquence du signal qu'il émet par **effet Doppler**) donnent accès à sa position le long de son orbite à condition de connaître avec précision les coordonnées de l'endroit d'où ils effectuent leurs observations. Dès 1960 – les premiers vols habités n'auront lieu que l'année suivante –, une constellation de cinq satellites permet à la marine américaine de connaître la position de ses bâtiments une fois par heure. En 1968, le système de navigation Omega, associant sept pays dont les Etats-Unis et la France, utilise les informations de huit stations au sol pour localiser avions et navires, avec pour objectif de couvrir l'ensemble des océans du globe. La précision limitée des mesures, entre cinq et dix kilomètres en moyenne, ne permet que le guidage en haute mer. D'abord réservé aux militaires, Omega s'ouvre peu à peu aux civils ; le système est finalement abandonné en 1997, victime du succès de la technologie GPS.

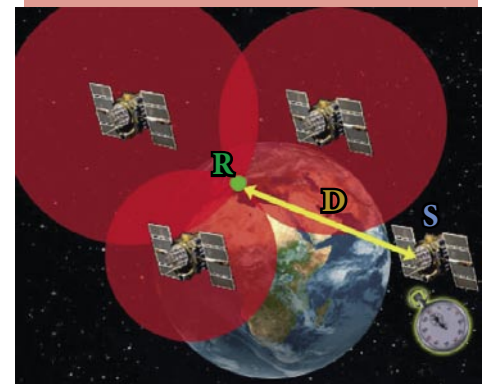
Le GPS (« Global Positioning System » en français « Géo-Positionnement par Satellite » pour conserver l'acronyme) est un système permettant d'établir précisément la position d'un récepteur (R), a priori situé n'importe où sur la Terre. Pour cela, ce dernier reçoit à intervalles réguliers des signaux provenant de satellites (S) dont les positions sont connues en temps réel et les traite grâce à son calculateur intégré. Les ondes électromagnétiques (lumière, radio, etc.) se déplaçant à la vitesse de la lumière, le temps mis par un signal pour aller d'un satellite au récepteur donne la distance (D) séparant les deux objets. Le récepteur se situe donc quelque part sur une sphère de centre S et de rayon D. En combinant les informations de plusieurs satellites, on obtient autant de sphères dont l'intersection fournit finalement la position précise de R. La même mesure effectuée à des instants



Écusson du système GPS.

### Effet Doppler

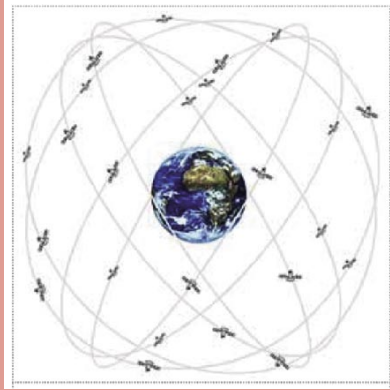
Les ondes (sonores ou électromagnétiques) émises par une source en déplacement voient leur longueur d'onde (et donc leur fréquence) modifiée quand elles sont captées par un récepteur immobile. Ainsi le bruit d'un moteur nous paraît plus aigu/ grave quand la voiture vient vers nous/se fait plus distante. De même, la lumière en provenance d'une galaxie qui s'éloigne de la Voie Lactée est « décalée vers le rouge ». Plus généralement, la différence entre la longueur d'onde du signal reçu et celle qu'il aurait si sa source était immobile permet de déterminer la vitesse relative de l'émetteur par rapport au récepteur.



DR  
Reconstruction de la position du récepteur à partir des mesures des satellites GPS.



# Le GPS



Les 31 satellites GPS actuellement en orbite se répartissent sur six orbites inclinées de 55 degrés par rapport à l'équateur et d'altitude moyenne 20 200 km. Chacun de ces plans contient au minimum quatre satellites répartis de manière équidistante et on passe d'une orbite à ses voisines par une rotation de  $\pm 60$  degrés autour de l'axe Sud-Nord. Dans cette configuration, quatre (six) satellites sont visibles de n'importe quel point du globe (presque) en permanence. À hautes latitudes les satellites sont plus bas sur l'horizon sans que cela n'affecte de manière significative la précision de la mesure GPS. Le système est également robuste vis-à-vis de pannes multiples.



Un satellite GPS, exposé au musée de l'Air et de l'Espace à San Diego (Californie).

successifs permet ainsi de suivre les déplacements du récepteur (vitesse et direction), qu'il soit sur le bateau d'un navigateur solitaire doublant le Cap Horn ou dans votre voiture.

Les premiers satellites GPS sont lancés en 1978. Les mises sur orbite se succèdent ensuite, afin d'augmenter la taille de la flotte et de remplacer les anciens instruments par de nouveaux, plus performants. Le système devient opérationnel sur l'ensemble du globe en 1995 ; enfin, le 1<sup>er</sup> mai 2000, le président américain Bill Clinton annonce la fin du système de brouillage des signaux destinés aux civils : la précision des mesures s'améliore d'un facteur dix, ce qui ouvre la voie à la diffusion du GPS – rien qu'en France 2,5 millions de récepteurs ont été vendus en 2007.

## Le GPS comment ça marche ?

Pour connaître les trois grandeurs (latitude, longitude et altitude) définissant la position d'un objet sur Terre il faut au minimum trois informations et donc, dans le cas du GPS, trois satellites. En fait, cette configuration minimale n'est pas satisfaisante, à la fois pour une raison fondamentale sur laquelle nous reviendrons dans la suite, mais aussi parce que la précision des mesures dépend de la position des satellites, laquelle varie en permanence. De plus, des problèmes temporaires sur l'un ou l'autre des émetteurs ne doivent pas interrompre la circulation de l'information GPS. Il y a donc au minimum 24 satellites GPS en orbite, disposés de manière à ce que quatre d'entre-eux au minimum (et bien plus la plupart du temps) soient visibles quelle que soit la position du récepteur sur Terre. Ils font un tour de la Terre en 11 heures 58 minutes et reviennent donc régulièrement à la même position dans le ciel, ce qui simplifie leur suivi depuis le sol. Leur guidage est assuré par l'armée de l'air américaine depuis ses bases enterrées dans les Montagnes Rocheuses au Colorado et par un réseau de stations de télémétrie réparties sur l'ensemble du globe.

En plus des données à usage purement militaire, chaque satellite GPS émet deux types de signaux « en clair », à destination des civils. Leur fréquence, de l'ordre du gigahertz, est un compromis entre spécifications techniques et lois physiques gouvernant la propagation des ondes électromagnétiques dans l'atmosphère.

- Une suite de 1023 **bits** répétée toutes les millisecondes est utilisée pour **déterminer la distance émetteur-récepteur**.
- Le signal de navigation est émis avec un débit de 50 bits/s et chaque message dure typiquement 30 secondes. Durant les six premières, le satellite envoie des informations sur son état – un engin dont l'orbite est instable, par

### Bits

Le bit est le bloc d'information élémentaire : il ne peut prendre que deux valeurs, 0 ou 1. Tout chiffre, et plus généralement tout caractère, peut être codé par une succession de bits et la transmission d'information par le biais de cet alphabet, est à la base de l'électronique et de toutes ses applications.

exemple parce qu'elle est en train d'être modifiée depuis le sol, ne doit pas être utilisé pour déterminer une position GPS – ainsi que des paramètres de correction pour les **horloges atomiques** embarquées. Ensuite, l'éphéméride, c'est-à-dire tout ce qu'il faut savoir sur l'orbite particulière du satellite, est



# Le GPS

transmis pendant douze secondes. Bien que ces données soient valables quatre heures, elles sont normalement mises à jour toutes les deux heures. Enfin vient l'almanach, un ensemble d'informations sur la constellation dans son ensemble (orbite, statut technique, code numérique d'identification, etc. pour chaque satellite) ainsi que des données environnementales nécessaires pour corriger la mesure. L'almanach représentant un volume de données conséquent, chaque message met à jour 4% de son contenu.

## Précisions, corrections et erreurs : applications et limites du GPS

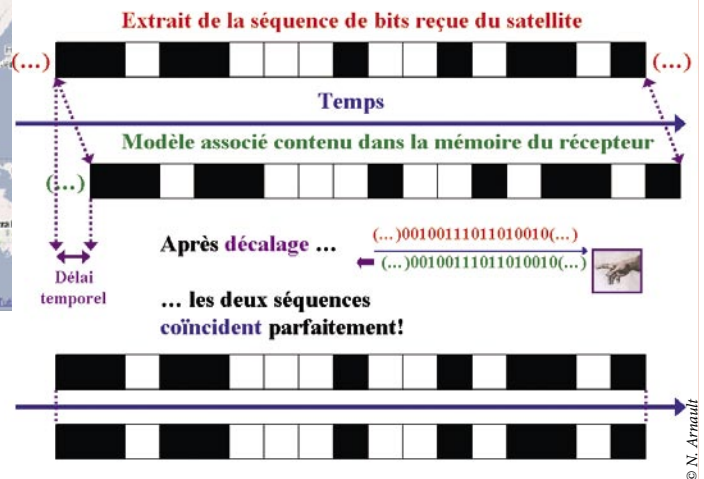


11 satellites GPS (en jaune) visibles par un récepteur situé à Rome le 28 juillet 2008 à 17h20.

À la base du GPS se trouvent donc des mesures de temps dont la précision doit être d'autant plus grande que le facteur de conversion temps → distance – la vitesse de propagation des ondes électromagnétiques – est gigantesque : une erreur d'un millionième de seconde conduit à une position fautive de trois cent mètres ! Non seulement vous n'êtes pas dans l'allée du garage de beau-papa mais en plus vous avez probablement roulé sur les rosiers très rares de belle-maman avant d'atterrir avec votre voiture dans le ruisseau en contrebas... Pour éviter ce scénario catastrophe, les inventeurs du GPS ont pensé à tout : la redondance des mesures (quatre au minimum pour déterminer seulement trois coordonnées ; un récepteur standard est aujourd'hui capable de lire douze, voire vingt canaux en parallèle) permet de calculer et de corriger le décalage du récepteur par rapport aux émetteurs, synchronisés entre eux grâce aux informations contenues dans les messages de navigation.

**Déterminer la distance émetteur-récepteur**  
Chaque satellite émet une suite de 1023 bits qui lui est propre. Les séries utilisées sont aussi différentes que possible de manière à assurer une identification sans erreur des émetteurs visibles. Le récepteur les connaît toutes et les génère en boucle. Il estime ainsi la distance le séparant de chacun des satellites en comparant les séquences produites avec les signaux reçus.

Le principe est simple : chaque série de bits peut être vue comme une bande de tissu bicolore (par exemple blanc pour « 0 » et noir pour « 1 »). Posant les bandes « émetteur » et « récepteur » l'une sous l'autre, le décalage entre les deux motifs permet de remonter à la distance séparant les deux instruments. En pratique, l'opération est plus complexe : la bande de tissu livrée par le satellite arrive « froissée » (à cause de l'effet Doppler dû au mouvement relatif entre émetteur et récepteur) et « salie » (du bruit parasite s'est ajouté au signal sur son parcours) ; il faut donc la « repasser » et la « nettoyer » pour assurer le succès de la comparaison. La précision du résultat est très bonne : de l'ordre du centième de l'intervalle de temps séparant deux bits consécutifs, soit trois mètres environ une fois convertie en distance – la vitesse de propagation des ondes électromagnétiques vaut 300 000 km/s.



Une difficulté supplémentaire provient du fait que la séquence est courte : elle revient toutes les millisecondes soit tous les 300 km à la vitesse de la lumière ! La mesure n'est donc pas absolue puisqu'elle correspond à plusieurs distances, une seule étant correcte. La position du récepteur est déterminée par itérations successives en comparant les données issues de plusieurs satellites et en utilisant sa dernière position connue. Ceci explique pourquoi la phase d'initialisation d'un boîtier GPS longtemps éteint peut être assez longue, surtout s'il a été transporté sur une grande distance : en plus de prendre contact avec les satellites maintenant visibles, il lui faut comprendre où il se trouve !



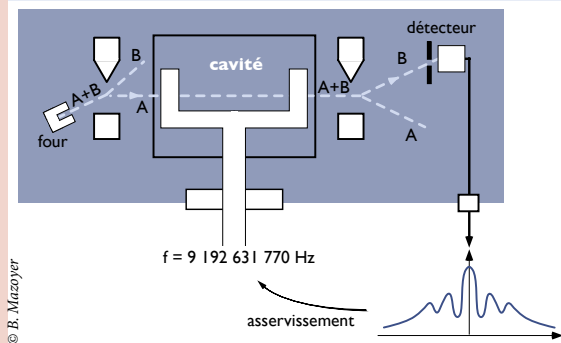


# Retombées

## Le GPS

### Horloges atomiques

Mesurer un temps revient toujours à compter le nombre de fois où un phénomène répétitif ou défini par convention (oscillation d'un balancier, seconde, etc.) se produit pendant la « durée » d'observation. Une horloge est donc un métronome dont la précision dépend de la stabilité de la mesure qu'elle bat. Celles qui sont actuellement – et de très loin – les meilleures sont basées sur une conséquence de la mécanique quantique : l'énergie d'un atome est quantifiée, c'est-à-dire qu'elle ne peut prendre que des valeurs bien précises. L'état fondamental correspond à l'énergie



© B. Mcazyer

Principe de fonctionnement d'une horloge atomique

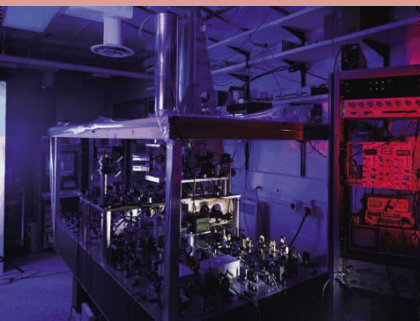
la plus basse tandis que les autres niveaux décrivent des états dits « ex-cités ». Les seules transitions permises correspondent à l'absorption (l'émission) d'un photon apportant (emportant) exactement la différence d'énergie entre les états final et initial. Or l'énergie d'un photon est directement proportionnelle à la fréquence de l'onde électromagnétique associée.

Il « suffit » ainsi d'utiliser une transition atomique particulière d'un état « A » à un état « B » pour obtenir un étalon de fréquence parfaitement stable. Une horloge atomique contient un oscillateur mécanique (par exemple un morceau de quartz comme dans les montres-bracelets) dont le battement est accéléré jusqu'à avoir une fréquence aussi proche que possible de celle de la transition atomique utilisée.

L'oscillation ainsi générée est convertie en signal électrique puis envoyée dans une cavité spécialement conçue pour entretenir une onde électromagnétique de même fréquence et dans laquelle des atomes dans l'état A sont injectés. Les passages A → B sont d'autant plus probables que la fréquence est proche de celle de la transition atomique – phénomène dit de résonance. La comparaison du débit d'atomes dans

l'état A/B à l'entrée/sortie de la cavité est finalement utilisée comme « signal d'erreur » et sert à ajuster l'oscillation mécanique.

Une fois le système stabilisé (dans la réalité, les opérations décomposées ci-dessus s'enchaînent et se répètent continuellement), on dispose d'un métronome ultra-précis sur des durées très longues : en février 2008, des scientifiques de l'université de Boulder ont annoncé avoir mis au point une horloge dont l'erreur est inférieure à une seconde chaque 200 millions d'années. Une telle montre mise en route lors de la formation de la Terre serait décalée de moins de trente secondes aujourd'hui !



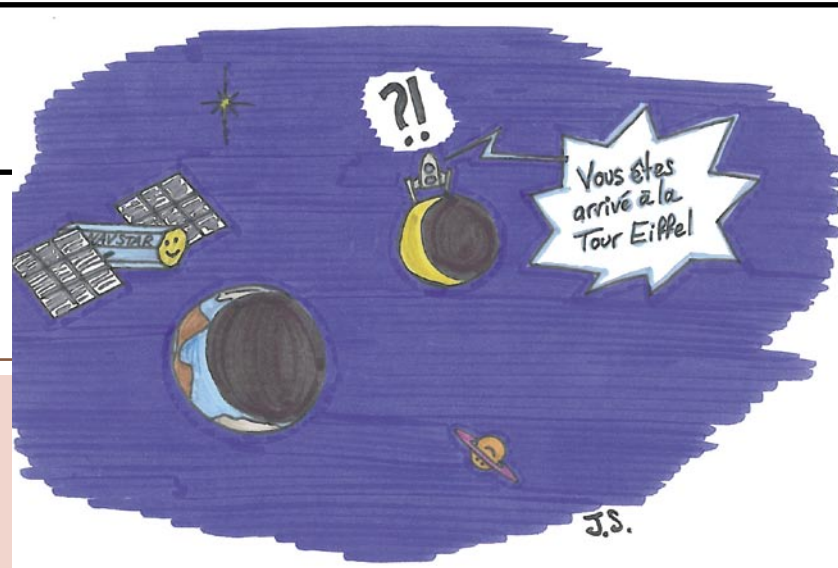
Horloge atomique à « fontaine de césium » utilisée comme référence aux États-Unis depuis l'an 2000. Une horloge similaire est employée comme étalon en France. En effet, la définition officielle de la seconde (et par ricochet celle du mètre puisque la vitesse de la lumière dans le vide est fixée à 299 792 458 m/s) est actuellement basée sur une transition particulière de l'atome de césium 137 dont la fréquence vaut très précisément 9 192 631 770 Hz. Les atomes de césium, refroidis et donc ralentis autant que possible, sont injectés de bas en haut dans la cavité contenant l'onde électromagnétique de très haute fréquence : comme ils finissent par retomber sous l'effet de leur poids, le temps qu'ils passent dans celle-ci est donc doublé ce qui améliore la précision de la mesure. Dans les satellites GPS, les horloges atomiques embarquées sont évidemment beaucoup moins encombrantes.

**La précision du GPS** vient également de la rigueur et de la qualité des lois physiques sur lesquelles il est basé. En particulier, deux effets relativistes dégraderaient considérablement les performances du système s'ils étaient ignorés. La Relativité Restreinte nous apprend que les horloges des satellites – en mouvement à grande vitesse (environ 10 600 km/h) autour de la Terre – battent plus lentement que celles restées immobiles au sol. La différence n'est pas négligeable, 7,2 microsecondes ( $\mu$ s) par jour ou 2200 mètres d'erreur environ pour un signal voyageant à la vitesse de la lumière. Quant à la Relativité Générale, elle prédit un effet opposé et plus conséquent (45,9  $\mu$ s/jour) dû au fait que le champ gravitationnel est plus faible en orbite. Le décalage cumulé est donc d'environ 39  $\mu$ s/jour. Pour le compenser, la fréquence des horloges embarquées est légèrement plus faible que celles des stations au sol : 10,22999999543 MHz au lieu de 10,23 MHz.

De plus, les conditions atmosphériques influent sur la propagation des impulsions GPS – la vitesse de la lumière n'est constante que dans le vide absolu ; ailleurs elle est plus faible et varie en fonction du milieu traversé. Ces effets, inconnus a priori puisqu'ils dépendent de la densité de l'air, jouent d'autant plus que l'émetteur est bas sur l'horizon et le récepteur à faible altitude. Les variations d'humidité et de pression dans les basses couches de l'atmosphère sont locales et évoluent rapidement ce qui rend leur prise en compte difficile. Par contre, leur effet dépend de la fréquence de l'onde électromagnétique. Or, un satellite GPS émet plusieurs signaux à des fréquences bien distinctes. En comparant leurs distorsions, on peut estimer la correction à apporter à la mesure sans même avoir besoin de décoder les signaux supplémentaires utilisés comme référence.

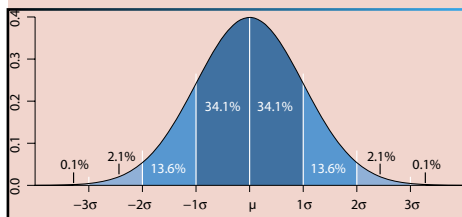


# Le GPS



## Précision du GPS

Un récepteur du commerce a une précision d'environ 5 mètres. Cette valeur remarquable suffit à expliquer le succès de cet outil auprès du grand public et vaut la peine qu'on s'y arrête un instant. Que signifie-t-elle en pratique ? On peut représenter la distribution de



l'erreur d'une position GPS donnée, par exemple celle de la Tour Eiffel à Paris, par une fonction gaussienne, de moyenne  $\mu$  et d'écart-type  $\sigma$ .  $\mu$  vaut évidemment 0 (faute de quoi le relevé GPS serait décalé d'une quantité fixe ce qui n'aurait pas beaucoup d'intérêt) tandis que  $\sigma$  correspond à la précision :  $\sigma = 5$  mètres

Comme le montre la figure ci-dessus, 68,2% des mesures donnent effectivement un résultat meilleur que «  $1\sigma$  », soit 5 mètres. Par contre, dans environ un tiers des cas, l'erreur est plus grande. Par exemple la probabilité qu'elle dépasse 10 mètres («  $2\sigma$  ») n'est pas négligeable :

4,4%. Heureusement, la fonction gaussienne décroît assez rapidement à mesure que l'écart par rapport à sa moyenne (là-aussi exprimé en « unité de  $\sigma$  ») augmente et seules 2 mesures sur 1000 environ sont fausses de plus de 15 mètres («  $3\sigma$  »).

Au final, une précision de 5 mètres signifie que le GPS donne « souvent » un résultat meilleur et qu'il ne se trompe « presque jamais » de plus de 15 mètres. Dans certains cas (relevés topographiques, séismologie ou volcanologie, transport, etc.) ces performances se révèlent insuffisantes et des systèmes plus complexes doivent être mis en place pour les améliorer. Le GPS différentiel utilise une station de référence proche dont la vraie position est connue avec précision. La comparaison entre cette valeur et la mesure donne l'ordre de grandeur de l'erreur GPS à un instant donné et cette information permet de corriger le relevé du point étudié. Dans le domaine du transport aérien les systèmes WAAS (États-Unis) et EGNOS (Europe, encore en développement) servent au guidage de précision des avions dans les phases d'atterrissage et de décollage : leur précision est de l'ordre du mètre, simultanément dans les trois dimensions d'espace.

Les réflexions multiples (sur un immeuble, dans une vallée encaissée, etc.) sont une autre source potentielle d'erreur de mesure car elles allongent le parcours des ondes. On peut s'en affranchir quand le récepteur est en mouvement car les signaux réfléchis donnent des positionnements aberrants et donc facilement détectables. Parmi les autres limitations du système, on peut citer la faiblesse du signal reçu sur Terre et la facilité avec laquelle il peut être perturbé, au moins localement, par d'autres émetteurs utilisant le spectre électromagnétique.

Un dernier atout du GPS, et pas le moindre, est qu'il est entièrement basé sur une technologie passive : comme son nom l'indique, le récepteur ne fait que ... recevoir et ne renvoie aucune information, ce qui rend illimité le nombre potentiel d'utilisateurs. Vue d'Europe, le seul point critiquable de ce système de navigation est le fait qu'il est propriété des États-Unis et que ses satellites sont contrôlés par l'armée américaine. Cette dépendance stratégique n'étant pas souhaitable sur le long terme, l'Union Européenne s'est lancée dans la mise au point de son propre système de positionnement par satellite, Galileo. Cette initiative, très mal vue au départ Outre-Atlantique, a finalement été acceptée et un accord a été trouvé pour que les utilisateurs puissent passer d'un type de signal à l'autre dans le cas où celui qu'ils utiliseraient aurait une défaillance.

Après de nombreux retards dus en grande partie à la nécessité d'adapter les demandes de participation des États aux réalités industrielles et à la recherche d'un équilibre entre secteurs public et privé, le projet semble enfin être sur les bons rails. La phase de démonstration des technologies, marquée par le lancement de deux satellites est en voie d'achèvement ; elle sera suivie par l'envoi de quatre satellites de validation – en 2010 au plus tôt – avant un déploiement de la constellation (une trentaine de satellites au total) vers 2013-2015.



© Élémentaire

Un des premiers récepteurs GPS grand public, exposé au Musée de la Science et de l'Industrie de Chicago.



Logo du futur système européen de positionnement global par satellite Galileo.