



© Golden Dayz / Shutterstock

# Géolocalisation : Des progrès et des problèmes

## Les systèmes de positionnement

### Introduction

**Nel Samama**

Professeur IMT/Telecom Sud Paris

**Denis Manteau**

Membre senior SEE

#### Historique des techniques de positionnement

Dès que l'être humain a décidé d'explorer de nouveaux territoires, il a eu besoin de pouvoir se localiser ou de localiser sa destination. Dans un premier temps, seuls les déplacements terrestres étaient concernés et la question était de pouvoir

revenir chez soi. La fonction de « retour » était assurée par des « marqueurs » spécifiques dans le paysage qu'il fallait mémoriser.

Très vite, du fait de la possibilité de transporter de très grosses charges par mer, le transport maritime est devenu un mode de déplacement intéressant. L'absence totale de « repères » en mer a fait naître de nouveaux besoins en matière de positionnement. Les navigateurs avaient donc le choix entre suivre la côte, où des repères terrestres sont disponibles, ou trouver une technique de positionnement sans visibilité de la côte. C'est le point de départ du positionnement géographique.

Une certaine compréhension de la mécanique céleste a permis rapidement de permettre la détermination de la latitude du lieu d'observation par la mesure, dans l'hémisphère nord, de la hauteur de l'étoile polaire. Une telle étoile n'existant pas dans l'autre hémisphère, de nouvelles techniques fondées sur l'observation du Soleil en particulier ont permis de mesurer la latitude également au sud (par l'utilisation de tables appelées « éphémérides », vocable qui fait aujourd'hui encore partie de l'arsenal des technologies modernes). Le problème de la détermination de la longitude fut une autre histoire qui réclama de nombreux siècles de réflexion pour aboutir à la fin du 18<sup>ème</sup> siècle. L'instrumentation

relative à ces mesures se développe alors rapidement, sextant et horloge marine.

### L'arrivée de la radio

Au fur et à mesure de développements technologiques, de nouvelles approches se dessinent, comme l'utilisation de la radio au début du 20<sup>ème</sup> siècle, ouvrant la voie à des performances inégalées. Les premiers systèmes sont basés sur la radiogoniométrie : en disposant d'une antenne tournante et en effectuant la détection de la puissance maximale, il était possible de déterminer la direction du point de repère. La *boussole radio* était l'une des formes les plus avancées des systèmes radiogoniométriques. Une autre approche est utilisée pour les *phares radio*. Comme l'identification et l'orientation des émetteurs devaient être faciles à obtenir, la technique consistait à disposer de deux antennes émettant des signaux complémentaires (par exemple l'équivalent de A « · – » et N « – · » en morse). Lorsqu'un récepteur se trouve dans les deux lobes principaux de rayonnement, le signal reçu est continu. En 1994, plus de 2000 phares radio étaient disponibles dans le monde.

Alors que les générateurs de temps locaux (oscillateurs ou horloges atomiques) se développent rapidement, de nouvelles utilisations des signaux radio sont imaginées. C'est le cas des *systèmes hyperboliques*. Le principe de base veut que tous les lieux ayant la même différence de temps de parcours du signal vers deux points fixes, par exemple deux émetteurs radio, se situent sur une figure géométrique qui est une hyperbole. Les points focaux de cette hyperbole sont les émetteurs. Avec l'augmentation des capacités de traitement des signaux, de telles estimations et mesures de la différence de temps sont devenues possibles. Il est à noter que la synchronisation au niveau du récepteur mobile est ainsi évitée tant que des différences de temps sont effectuées. L'idée de base était alors d'obtenir deux de ces différences afin de permettre le calcul du point d'intersection des deux hyperboles

**“À la fin des années 1920, des physiciens et des mathématiciens montrent qu'il est théoriquement possible d'imaginer des satellites artificiels lancés depuis la surface de la Terre et gravitant autour d'elle. Bien sûr, de nombreuses recherches sont encore nécessaires, mais on pense que c'est possible.”**

résultantes : cette approche conduit à un point unique théorique dans un espace bidimensionnel.

### L'utilisation des satellites

À la fin des années 1920, des physiciens et des mathématiciens montrent qu'il est théoriquement possible d'imaginer des satellites artificiels lancés depuis la surface de la Terre et gravitant autour d'elle. Bien sûr, de nombreuses recherches sont encore nécessaires, mais on pense que c'est possible. En 1952, le Conseil international des unions scientifiques a décidé que la période du 1<sup>er</sup> juillet 1957 à la fin de l'année 1958 serait l'« Année internationale de géophysique ». En octobre 1954, le conseil adopte une résolution fixant l'objectif du lancement de satellites artificiels au cours de l'année internationale. Il faut se rappeler que c'était l'époque de la guerre froide entre les États-Unis et l'Union soviétique : la proposition était un nouveau domaine de compétition, scientifique cette fois, entre les deux nations. En juillet 1955, la Maison Blanche annonce son souhait de procéder à un tel lancement et lance un appel à projets. En septembre 1955, le projet Vanguard, proposé par le Naval Research Laboratory, est sélectionné parmi d'autres pour représenter les États-Unis. L'histoire retiendra alors que le premier satellite artificiel fut Spoutnik, mais ce fut surtout le point de départ du premier système de positionnement par satellites américain, TRANSIT. Ce dernier représentant tous les éléments des premiers vols, les performances étaient restreintes (2D, pas continu dans le temps, fondé sur

l'hypothèse d'un récepteur statique, ...), mais représentait un apport au domaine de la navigation indéniable.

Alors que le système TRANSIT est devenu opérationnel en 1964 pour la marine américaine, les premiers travaux sur ce qui allait devenir, en 1973, le programme GPS (*Global Positioning System*) commencent par des tests sur le schéma CDMA (*Code Division Multiple Access*) et l'approche du code PRN (*Pseudo Random Noise*). Ces deux techniques, très répandues de nos jours dans les systèmes radio, et plus particulièrement dans les télécommunications sans fil, étaient des concepts très novateurs. En 1967, l'U.S. Navy lance le programme TIMATION pour évaluer l'effet de la relativité, à la fois spéciale et généralisée, sur une horloge atomique basée sur un satellite. En 1973, les programmes relatifs à la navigation par satellite de l'U.S. Navy et de l'U.S. Air Force fusionnent en un programme officiel de technologie de navigation appelé « NAVSTAR GPS » (pour « *Navigation Satellite with Time and Ranging Global Positioning System* »), un système de positionnement global par satellite avec mesure du temps et de la distance.

La principale différence avec le système TRANSIT est qu'il est désormais basé sur une technique de « trilatération », c'est-à-dire que plusieurs mesures de temps de propagation sont effectuées, menant à des estimations de distances entre les satellites et le récepteur, permettant à ce dernier de calculer sa position (TRANSIT était basé sur des mesures de décalage Doppler).



**“ Au milieu des années 90, le GPS est ainsi déclaré opérationnel et est mis à disposition de tous, gratuitement (le retour sur investissement des américains se faisant à travers leurs industriels qui ont alors un quasi-monopole sur les récepteurs). ”**

### ●●● L'avènement des systèmes mondiaux de navigation (GNSS)

Au milieu des années 90, le GPS est ainsi déclaré opérationnel et est mis à disposition de tous, gratuitement (le retour sur investissement des américains se faisant à travers leurs industriels qui ont alors un quasi-monopole sur les récepteurs). La disponibilité de ces signaux ouvre des perspectives nouvelles à de nombreuses communautés qui vont alors développer des applications non planifiées par les concepteurs, allant des systèmes grand public de navigation automobile aux récepteurs centimétriques de travaux publics en passant par une approche totalement inédite de géodésie spatiale. L'impact est tel que des aspects stratégiques entrent en considération et toutes les puissances militaires et économiques veulent leur propre constellation. C'est ainsi que l'on aboutit aujourd'hui à quatre systèmes mondiaux (GPS, GLO-NASS, Galileo et Beidou). De nombreux programmes annexes, de plus faible ampleur, se développent également localement afin de pallier certaines limitations comme la disponibilité, l'intégrité ou la fiabilité.

### Les systèmes PNT : une alternative aux GNSS ?

Dans le même temps, les télécommunications connaissent une révolution, passant d'un mode statique à un modèle individuel mobile (une comparaison avec l'avènement, il y a plus de deux siècles, de la montre individuelle portative, permet d'envisager alors un impact sociétal très fort). Cela induit deux constatations

qui découlent l'une de l'autre : les systèmes de navigation par satellites (dont on introduit alors le terme générique de GNSS pour « *Global Navigation Satellite Systems* ») ne fonctionnent pas dans tous les environnements, les zones urbaines denses et les milieux intérieurs étant les plus difficiles. En intérieur par exemple, ces systèmes sont souvent totalement indisponibles ... alors que les utilisateurs de ces nouveaux « téléphones mobiles » y sont en majorité. Cette problématique de disponibilité de la fonction de positionnement devient un nouvel enjeu technique. Nous allons passer des GNSS aux systèmes PNT (Positionnement, Navigation et Temps), plus larges, afin de tenter de fournir cette continuité de la fonction en utilisant toutes sortes de capteurs ou de traitements, seuls ou en combinaisons.

Ce sujet, le positionnement à l'intérieur des bâtiments, n'est malheureusement toujours pas réglé. Le coût très faible des GNSS, leur facilité d'intégration et l'absence de systèmes alternatifs ont également conduit à une large diffusion des puces, entraînant à son tour une utilisation de plus en plus fréquente de ces systèmes. Ainsi, la manière dont le positionnement est réalisé avec les GNSS est en effet devenue une norme et il est assez difficile de proposer d'autres visions (comme par exemple un positionnement qui ne serait pas continu dans le temps et l'espace, mais il s'agit là d'une autre discussion). Ce sont alors les limitations des GNSS qui ouvrent la voie à d'autres technologies : l'inertiel, la vision, les réseaux de télécommunications, locaux ou de couverture plus large, entre autres, entrent dans la danse.

Depuis une vingtaine d'années maintenant, diverses techniques et technologies ont été développées, évaluées et parfois mises en œuvre pour faire face à cette continuité. L'histoire ne semble pas terminée, car aucune approche n'a démontré qu'elle pouvait répondre à la question de manière définitive. Le problème semble en effet lié aux attentes des utilisateurs, gestionnaires de bâtiments ou citoyens ordinaires, qui recherchent une solution technologique gratuite et précise. Ceci est le point de départ du présent dossier concernant les problèmes et les réalisations réels du positionnement sous quelques-unes de ces (très) diverses formes.

### Les principes de fonctionnement du GPS

La technologie GPS repose sur un système de « trilatération » basée sur une mesure des temps de propagation entre les satellites et le récepteur, et une évaluation calculée sur cette base de la distance entre eux.

Le système GPS se compose de trois éléments :

- **des satellites en orbites** autour de la Terre, pour ce qu'on nomme le segment spatial, qui se présente sous la forme d'une constellation d'une trentaine de satellites principaux postés à environ 20 000 km de la Terre. Leur rôle est d'émettre un signal permanent. Les coordonnées du satellite GPS sont calculées par le récepteur à partir d'informations transmises par les satellites et vont permettre au récepteur de déterminer sa position.
- **Un poste de contrôle terrestre**, composé de stations sol réparties sur le globe,
- **La partie utilisateurs** – avec les smartphones, les systèmes de navigation, les outils topographiques – qui regroupent tous les récepteurs terrestres, en nombre illimité.

Le fonctionnement du GPS repose sur l'échange de signaux entre les satellites et les récepteurs. Les satellites disposent d'une horloge atomique à très faible dérive, et l'envoi d'ondes électromagnétiques à la vitesse de la lumière permet de calculer la distance entre ceux-ci et un récepteur.

Chaque satellite envoie sur Terre des informations qui comportent des éléments permettant de calculer la position dans l'espace du satellite. Le récepteur compare l'heure d'émission du signal à l'heure de la réception, qu'on multiplie par la vitesse du signal. On obtient ce qu'on nomme une pseudodistance. Une difficulté majeure réside dans le fait que les horloges des satellites et du récepteur ne sont pas synchronisées. Une solution à ce problème est trouvée en ajoutant une pseudodistance supplémentaire. On obtient également des données comprenant une marge d'erreur, qu'on peut affiner du moment qu'on dispose des données relatives à au moins 4 satellites.

Dans la réalité on se trouve dans l'espace, pas dans un plan. On doit donc utiliser des sphères pour représenter les positions possibles du récepteur, le satellite étant au centre de la sphère : l'intersection de deux sphères correspond à un cercle et l'intersection de 3 sphères correspond à deux points. En théorie il nous faut un quatrième satellite pour savoir lequel des deux points correspond à notre position (ceci représente uniquement l'aspect « géographique », la synchronisation réclamant un satellite supplémentaire, comme vu précédemment).

En pratique on élimine l'un des deux points, car il ne se trouve pas sur Terre mais à une position absurde si on est sur la terre. Trois satellites peuvent alors suffire pour connaître notre position sur le globe.

Cependant, comme le récepteur GPS ne possède pas lui-même d'horloge à faible dérive, la mesure de la distance des satellites est entachée d'une incertitude. Pour obtenir une position plus précise, on va recroiser le calcul avec les données d'au moins un satellite supplémentaire : avec quatre satellites, on parvient à obtenir une précision de quelques mètres. Plus on a de données d'un grand nombre de satellites (4, 5, 6...), plus la position calculée est fiable.

La nécessité des horloges atomiques dans les satellites provient du fait qu'on cherche à avoir une précision très importante sur la position : de l'ordre de quelques mètres sur la surface de la Terre. Il faut donc une très grande précision temporelle dans les signaux transmis à votre récepteur. Pour donner une idée : une différence d'une microseconde correspond à une erreur de 300 mètres sur la position !

En utilisant plusieurs constellations simultanément, votre téléphone peut proposer une position allant jusqu'à 1 ou 2 mètres de précision à la surface du globe dans un environnement dégagé de tout obstacle.

#### Prise en compte de la relativité

Pour calculer la position de quelques mètres sur la surface d'une planète, la

précision demandée est telle que des phénomènes relativistes, habituellement négligés, sont à corriger !

Il y en a deux principaux :

- le premier est dû à la vitesse de déplacement très grande des satellites : 14 000 km/h. Leurs référentiels de temps et d'espace sont différents du nôtre (sur Terre). Leurs horloges sont ainsi retardées de 7 microsecondes par jour.

- le second provient de la différence dans le champ gravitationnel terrestre auquel les satellites sont soumis, du fait de leur altitude élevée : 20 200 km. La relativité implique que l'écoulement du temps est accéléré si le champ gravitationnel diminue. On parle ici de 45  $\mu$ s par jour pour le satellite.

Ces deux effets cumulés produisent donc un décalage de 38  $\mu$ s quotidiennement (+45-7=38  $\mu$ s). Cela peut sembler peu, mais c'est suffisant pour produire une erreur supérieure à 11 km sur les mesures !

Des corrections sont donc à compenser pour que le système GPS soit fonctionnel. La théorie d'Einstein explique parfaitement ces problèmes. La relativité est donc bien utile dans la mise au point du GPS.

#### Le système d'augmentation local : LBAS

Le principe consiste à évaluer sur un point connu, l'écart entre coordonnées issues de la détermination GNSS et ses coordonnées réelles. Il en résulte un lot de corrections transposable sur des zones géographiques proches. Ces corrections sont ensuite appliquées au récepteur mobile en temps réel ou dans un logiciel de post-traitement. On parle alors de GNSS différentiel ou DGPS.

On distingue plusieurs types de corrections différentielles locales :

**“ Le fonctionnement du GPS repose sur l'échange de signaux entre les satellites et les récepteurs. Les satellites disposent d'une horloge atomique à très faible dérive, et l'envoi d'ondes électromagnétiques à la vitesse de la lumière permet de calculer la distance entre ceux-ci et un récepteur. ”**

**“Connaître sa position, se localiser suppose que l’on sache exprimer ses coordonnées dans un repère connu et utilisable par tous. Ce besoin de référentiel a donné lieu à de nombreux travaux au cours des siècles et a fondé la science nommée géodésie, destinée à représenter la surface terrestre.”**

### ••• • Correction différentielle DGPS :

Elle repose sur une communication entre le récepteur de la station de référence et le récepteur mobile. Cette méthode utilise les mesures du code de la porteuse L1/E1.

### • RTK :

Le RTK utilise un autre principe de correction différentielle. Son avantage réside dans l'utilisation de la phase de l'onde porteuse. Cette phase permet des mesures infracentimétriques des « pseudo-distances » et donc de positionner en RTK un mobile avec une précision centimétrique. Ce mode différentiel diffère du précédent en ce qu'il met en œuvre plusieurs différences successives afin de totalement éliminer certaines erreurs comme la synchronisation des satellites entre eux ou celle entre les deux récepteurs.

### Le système d'augmentation spatial : SBAS

**Le principe :** des satellites supplémentaires, géostationnaires en particulier, délivrent en temps réel des corrections permettant d'accroître potentiellement la précision. Ils transmettront également des informations permettant de garantir l'intégrité de ces corrections. C'est le réseau de stations au sol qui va permettre l'observation des erreurs.

**Exemple :** EGNOS (*European Geostationary Navigation Overlay Service*) est le service SBAS qui couvre l'Europe. A ce jour il dispose de deux stations de référence en France Métropolitaine et utilise trois satellites géostationnaires en Europe. Ce système permet d'atteindre une pré-

sion métrique dans de bonnes conditions de réception.

Plusieurs zones géographiques disposent de leur propre service, comme EGNOS qui est disponible en Europe, d'autres services SBAS couvrent le globe. C'est le cas de WAAS, MSAS, GAGAN...

### Localisation et référentiel

Connaître sa position, se localiser suppose que l'on sache exprimer ses coordonnées dans un repère connu et utilisable par tous. Ce besoin de référentiel a donné lieu à de nombreux travaux au cours des siècles et a fondé la science nommée géodésie, destinée à représenter la surface terrestre.

Citons Eratosthène, Christophe Colomb et Newton comme d'importants contributeurs ou utilisateurs de cette science, chacun à son époque.

La Terre est maintenant représentée comme un « géoïde », après avoir été vue comme une sphère puis un ellipsoïde aplati aux deux pôles. On sait maintenant que sa forme n'est pas régulière géométriquement et aussi qu'elle change et se déforme en permanence (et pas en fonction du changement climatique !), en particulier à cause des mouvements tectoniques de la croûte terrestre. Notons encore que les mers et océans, qui recouvrent les trois quarts de la planète, sont un sujet d'études et de mesures précises qui permettent de caractériser les paramètres très divers de variations du niveau des océans.

Globalement, il a été indispensable de définir un référentiel qui tourne avec la Terre et est universel, le référentiel géographique. Les coordonnées d'un point sont définies par sa longitude (par rapport à un méridien de référence comme Greenwich ou Paris) et une latitude. Ce référentiel a servi de base pour définir le ECEF (*Earth Centred-Earth Fixed*), qui utilise l'axe des pôles et le méridien de Greenwich.

Sur la terre émergée, le besoin de cartographie a fait adopter des systèmes de projection permettant de représenter sur une carte (un plan en papier) une surface pseudo-sphérique, ce qui induit donc quelques déformations. C'est ainsi que l'on a défini les projections dites Mercator UTM cylindrique et Lambert qui est conique.

La projection universelle de Mercator UTM est une projection sur un cylindre d'axe Nord Sud tangent à l'équateur. Elle divise la Terre en soixante zones de 6 degrés, chacune découpée en vingt bandes de 8 degrés d'écart en latitude. La projection UTM est souvent utilisée avec d'autres référentiels géodésiques comme le WGS84 du GPS. La projection de Lambert est une projection conique sécante (le cône coupe la « sphère » terrestre en deux parallèles dits standards). La représentation de la France est associée au Système géodésique NTF (Nouvelle Triangulation de la France) et divise le pays en quatre zones (y.c. la Corse). Une projection moins fidèle est faite pour avoir une couverture du pays en une seule zone.

Il est compréhensible que le système GNSS (GPS, Galilée, Beidou, Glonass et Cirus compléments) n'utilisent pas ces systèmes de projection destinés à produire des cartes terrestres. La position du mobile est déterminée par un calcul basé sur la position des satellites (dans un référentiel géodésique spécifique) et une triangulation faite sur la base des trajets radio des signaux émis par ces satellites. On comprend que ce calcul ne peut donner qu'une position exprimée dans le même référentiel que celui utilisé pour les satellites. Les systèmes de GNSS utilisent

## “La conversion d’un système GNSS à un système de représentation cartographique est une opération complexe qui nécessite généralement sept paramètres (trois traductions, trois translations et un facteur d’échelle pour la transformation de Helmert).”

des référentiels géodésiques nommés WGS84 pour GPS, PZ90 pour Glonass et GTRF pour Galileo. Ils sont tous basés sur un modèle elliptique de la Terre, avec un rayon équatorial de 6378 km et un demi axe polaire de 6356 km (ils diffèrent dans les mètres et décimètres de ces rayons).

La conversion d’un système GNSS à un système de représentation cartographique est une opération complexe qui nécessite généralement sept paramètres (trois traductions, trois translations et un facteur d’échelle pour la transformation de Helmert). Elle est précalculée et imprimée sur certaines cartes, en particulier celles de l’IGN nommées TOP25 qui donnent le carroyage Lambert/NTF et les coordonnées GNSS sur la même carte.

Enfin, il faut mentionner le système unique ITRS (*International Terrestrial Reference System*). Ce référentiel géodésique vise à fournir une précision très forte (1 cm) et stable dans le temps des coordonnées d’environ 200 points situés à la surface du globe (qui est déformable). Du fait de ces déformations, dues à la dérive des continents, il faut mettre à jour périodiquement les coordonnées des points de mesure et publier une liste de valeurs appelée référentiel ITRF valide pendant quelques années.

A l’ITRF 2008 a succédé l’ITRF 2013.

### Contenu du dossier

Le présent dossier est composé des textes suivants :

- Un premier article qui décrit l’apport du projet de satellite GENESIS au référentiel

géodésique ITRF, par **Hanane Ait-Lakbir** de l’Observatoire de Paris ;

- Un article expliquant l’intérêt d’introduire une constellation de satellites à basse altitude LEO pour améliorer les performances du GNSS par **Michel Monnerat** et **Hanaa Al Bitar** de Thales Alenia Space ;

- Un article détaillant comment on peut recevoir le GNSS en souterrain, dans un tunnel ou dans le métro, par **Joel Korsakissok** de SYNTONY GNSS ;

- Un article qui explique comment les réseaux de communications radio mobiles 5G peuvent contribuer à donner accès à la localisation des mobiles et à fournir une solution de localisation en intérieur par **Raphael Bernard** d’Orange Innovations ;

- Le dernier article qui décrit comment localiser un piéton dans des milieux hostiles où le GNSS n’est pas présent comme les scènes de catastrophes ou d’incendie ou des terrains de conflit armé, par **Jean-Baptiste Gilbert**, **Pierre Boileau** et **Pierre-Yves Le Guen** de l’entreprise SYSNAV. ■

### Les auteurs



**Nel Samama**, Professeur à Télécom SudParis, travaille sur les systèmes de positionnement depuis une trentaine d’années. Les travaux initiaux ont porté sur des systèmes fournissant la continuité en intérieur de la fonction « localisation », en particulier en travaillant sur le comportement des horloges des GNSS. Ceci a conduit, ces dernières années, à développer des approches de détection du leurrage de récepteurs. Ses travaux actuels portent sur des systèmes de localisation en intérieur à déploiement simplifié, notamment en intégrant la fonction dans des matériels dont la présence et la maintenance dans tous les bâtiments publics sont obligatoires et normalisées.



**Denis Manteau** a fait toute sa carrière dans l’industrie des Télécoms. A Thomson-CSF il dirige de grands projets pour le ministère de la Défense, puis intègre en 1995 la Direction du réseau de SFR où il est Directeur technique puis Directeur du réseau fixe pour Télécom Développement et Cegetel. Passé chez Alcatel-Lucent en 2005, il contribue à quelques grands projets d’externalisation et est ensuite Directeur général d’une société de services indépendante à partir de 2011.

## Les articles

<b>Vers un positionnement plus précis : améliorer les repères de référence grâce à la mission GENESIS</b> .....	p.52
<b>LEO PNT : une évolution technologique nécessaire pour une nouvelle demande applicative</b> .....	p.58
<b>Recevoir le GPS en souterrain</b> .....	p.65
<b>La géolocalisation par le réseau cellulaire terrestre 4G/5G</b> .....	p.72
<b>La technologie de localisation magnéto-inertielle de SYSNAV au service de la sécurité des personnels</b> .....	p.78