

# 1

## La navigation par satellite

---

Nous nous penchons dans ce premier chapitre sur les principes de fonctionnement des systèmes de navigation par satellite.

Ces systèmes à l'immense potentiel ont été rendus possibles par les progrès réalisés depuis cinquante ans dans la mise au point d'horloges ultrastables et dans le développement de vastes constellations de satellites.

Nous allons passer en revue l'ensemble des phénomènes qui améliorent ou dégradent les performances des récepteurs GPS, et bientôt Galileo.

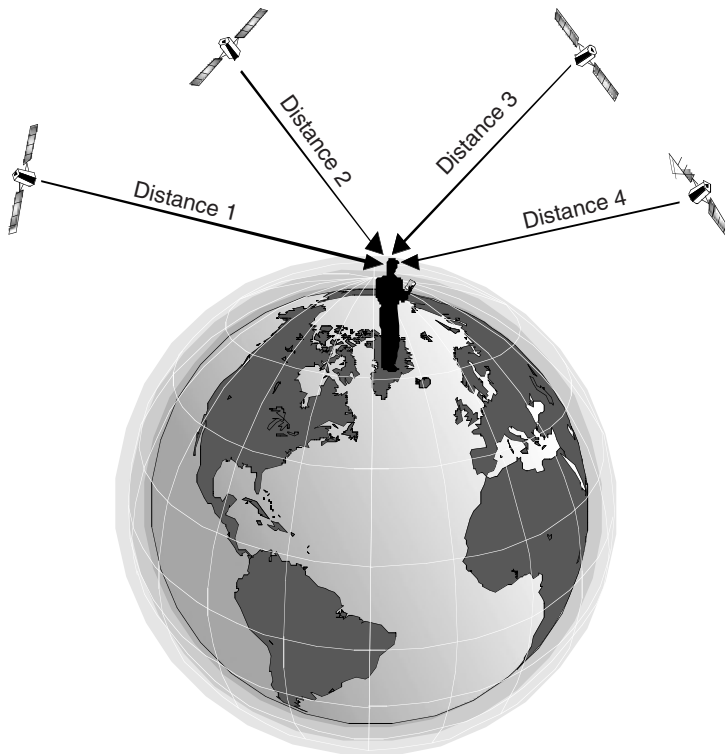
### **Le principe du positionnement par satellites Galileo et GPS**

Les systèmes Galileo et GPS reposent sur le même principe de fonctionnement :

- Une constellation de satellites en orbite autour de la Terre :
  - Chaque satellite de la constellation diffuse en permanence un signal vers l'ensemble des zones visibles de la Terre.
  - Chaque satellite inclut dans son signal les informations donnant sa position précise dans l'espace.

- Un nombre illimité de récepteurs utilisateur. Chacun de ces récepteurs est doté des propriétés suivantes :
  - Réception des signaux provenant d'au moins quatre satellites de la constellation (nous verrons pourquoi quatre satellites sont nécessaires au récepteur pour se positionner).
  - Mesure des distances qui le séparent de ces quatre satellites.
  - Calcul de sa position en combinant les quatre mesures de distance avec les informations de position de chacun des satellites et qui sont diffusées dans leur signal.

La figure 1.1 illustre ce principe de fonctionnement.



**Figure 1.1**

*Principe de positionnement par satellites d'un récepteur*

À partir de la réception des signaux des satellites, chaque récepteur établit sa position de manière autonome grâce à un minicalculateur intégré.

### ***Qu'est-ce qu'une position ?***

On appelle *position* un jeu de trois paramètres, qui permet de repérer un lieu dans l'espace par rapport à une référence connue. Par exemple, la longitude, la latitude et l'altitude permettent de repérer n'importe quel lieu à la surface terrestre. De même, ce sont les distances d'un objet par rapport à un mur de gauche, à un mur de devant et au sol qui permettent de le positionner dans l'espace d'une pièce.

Nous concevons ainsi intuitivement que nous ayons besoin de trois mesures par rapport à des repères dont la position est connue pour déterminer la position d'un objet quelconque.

Un récepteur GPS ou Galileo établit lui aussi sa position au moyen de mesures de distance par rapport à des satellites dont la position est connue. Mais pourquoi lui faut-il quatre mesures, et non trois, pour établir sa position ?

Pour le comprendre, nous devons nous intéresser à la façon dont est obtenue la mesure de distance, dite aussi mesure de *ranging*, entre le récepteur et un satellite.

### ***La mesure de distance***

Imaginons un voyageur sans montre dans un train qui part à 12 h 00 de la gare de Toulouse (heure donnée par l'horloge de cette gare), dont le train roule à la vitesse constante de 120 km/h, sans arrêt sur le trajet, et qui arrive à la gare de Montpellier à 14 h 00 (heure donnée par l'horloge de cette gare). Nous pouvons déduire que la distance qui sépare Toulouse de Montpellier est de 240 km ( $120 \text{ km/h} \times 2 \text{ heures}$ ).

Les mesures de distance effectuées par les récepteurs GPS et Galileo sont fondées sur le même principe. Le satellite (gare de Toulouse) possède une horloge et introduit dans son signal, à des instants très précis (disons à chaque nouvelle seconde de son horloge), une modulation, ou « bip » (qui correspond à notre train), laquelle se propage jusqu'au récepteur de l'utilisateur.

Le récepteur (gare de Montpellier) possède également une horloge, par rapport à laquelle il mesure très précisément à quel instant ce bip est reçu. En comparant l'instant où le bip a été émis et celui où il est reçu, le récepteur de l'utilisateur peut déterminer le temps de propagation du bip entre le satellite et le récepteur.

Connaissant la vitesse de propagation du signal provenant des satellites, qui correspond à la vitesse de la lumière, le récepteur peut déduire la distance parcourue par ce signal, et donc la distance qui le sépare du satellite.

La figure 1.2 illustre comment il est possible de déterminer une mesure de distance à partir d'une mesure de temps.

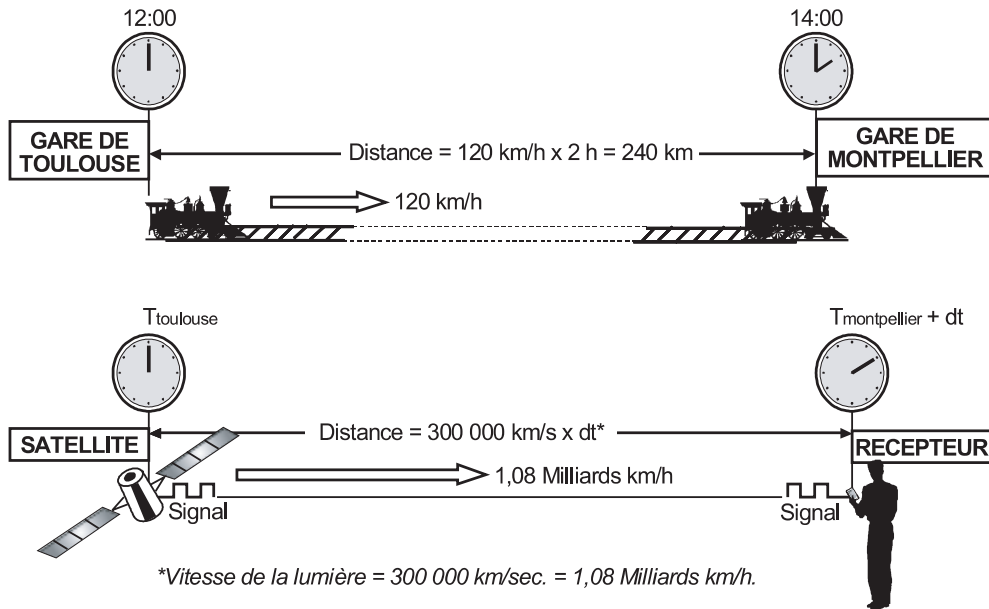


Figure 1.2

*Principe de la mesure de distance*

Afin de déterminer précisément ce temps de propagation, il est indispensable que l'horloge du satellite et celle du récepteur soient parfaitement synchronisées. En effet, une différence de synchronisation des deux horloges sera interprétée comme un temps supérieur ou inférieur de propagation du signal, et donc comme une distance plus grande ou plus petite.

Dans notre exemple, imaginons que l'horloge de la gare de Montpellier avance d'une minute. Le voyageur pensera avoir mis une minute de plus pour faire le trajet et fera donc une erreur de 2 km sur sa mesure de la distance entre Toulouse et Montpellier.

De la même façon, les ordres de grandeur des écarts de synchronisation des horloges des récepteurs GPS et Galileo et de leurs effets sur la mesure de distance sont les suivants :

- La distance entre un satellite Galileo ou GPS et un récepteur utilisateur est d'environ 20 000 km.

- La vitesse de propagation du signal est de 300 000 km par seconde (vitesse de la lumière), autrement dit :
  - Le signal parcourt les 20 000 km qui le séparent du récepteur en 70 ms (milli-seconde), soit 70 parts des 1 000 fractions d'une seconde.
  - Le signal parcourt 1 m en 3 ns (nanoseconde), soit 3 parts du milliard de fractions d'une seconde.

Pour reprendre une dernière fois notre exemple du train, avec un train voyageant à 120 km/h, si l'horloge de Montpellier avance d'une seconde, l'erreur de mesure de la distance est de 33 m. En imaginant un train voyageant à la vitesse de la lumière, l'erreur sur la mesure de distance entre Toulouse et Montpellier serait de 300 000 km...

La précision de positionnement visée par les systèmes Galileo et GPS est de moins de 10 m. Il s'agit donc, pour chaque calcul de positionnement, de synchroniser l'horloge du récepteur et celle du satellite avec une précision de quelques nanosecondes, soit quelques milliardièmes de seconde.

Nous verrons que cette synchronisation est en fait obtenue par le récepteur au cours du même calcul qui lui permet de déterminer sa position.

### ***Synchronisation des satellites et calcul de la position***

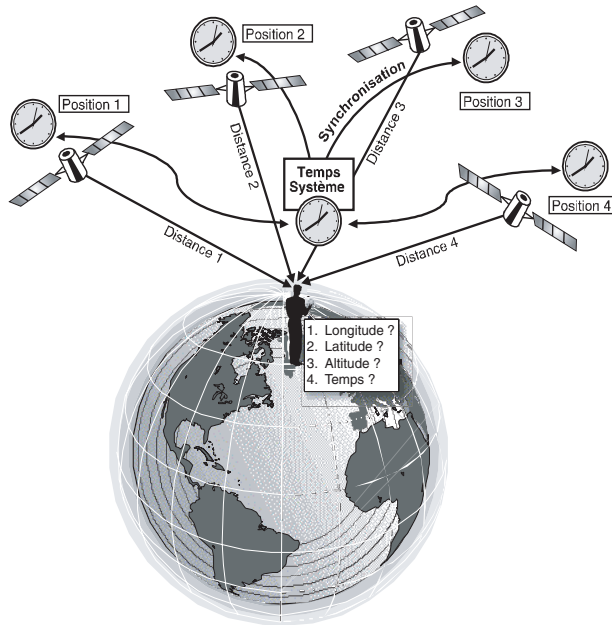
Une condition essentielle au calcul de la position est la synchronisation des satellites entre eux. Grâce à leurs infrastructures de mesures et de calculs au sol, les systèmes GPS et Galileo garantissent que les horloges des satellites sont très précisément synchronisées entre elles. Les satellites sont de la sorte tous synchronisés par rapport à une référence de temps commune, dite « temps système » (temps GPS, temps Galileo). Ces références de temps sont établies dans les infrastructures de contrôle des systèmes au sol et sont « raccordées » au temps universel, dit UTC (Universal Time Coordinates).

Nous pouvons maintenant revenir sur le calcul de la position par le récepteur. Comme les satellites sont synchronisés entre eux, le récepteur doit déterminer quatre paramètres inconnus :

- Trois paramètres définissant sa position dans l'espace (longitude, latitude, altitude).
- Un paramètre définissant l'avance ou le retard de son horloge par rapport au temps de référence du système qu'il utilise (temps GPS ou temps Galileo).

Un récepteur doit donc recevoir les signaux d'au moins quatre satellites pour établir sa position. Il obtient ainsi quatre mesures de distance lui permettant de calculer ses quatre paramètres inconnus.

La figure 1.3 illustre les relations entre la synchronisation des satellites, les quatre mesures de distance et les quatre paramètres à déterminer par le récepteur de l'utilisateur.



**Figure 1.3**

*Calcul de la position et du temps*

Maintenant que nous connaissons le principe de fonctionnement du positionnement par GPS ou Galileo, les propriétés remarquables suivantes sont à noter :

- Le nombre d'utilisateurs du système est illimité (le système n'est jamais saturé).
- Les systèmes GPS et Galileo permettent de se positionner très précisément à la fois dans l'espace (par rapport à un « modèle de référence terrestre ») et dans le temps (par rapport à un « temps de référence »).
- En déployant un nombre suffisant de satellites, le service de positionnement offre une couverture mondiale.
- En optimisant la géométrie de la constellation (nombre et position des satellites en orbite), les performances offertes sont homogènes sur l'ensemble du globe.

Ces propriétés font de Galileo et de GPS des systèmes de navigation dits « globaux », ou GNSS (Global Navigation Satellite System). Cela constitue une rupture technologique

dans tous les domaines d'activité qui exploitent une information de positionnement ou qui peuvent se développer grâce à une information de positionnement globale.

La question de la compatibilité des deux systèmes GPS et Galileo, et en particulier de leurs références de positionnement et de temps, est abordée au chapitre 7. Dès maintenant, nous pouvons comprendre que ces systèmes établissent de fait, grâce aux signaux qu'ils délivrent à tous les usagers et à leur couverture globale, une norme et une référence universelles pour le positionnement dans l'espace et dans le temps.

## Les constellations de satellites

Depuis la fin des années 1950, les différentes puissances spatiales ont déployé dans l'espace plusieurs milliers de satellites faisant en permanence le tour de la planète.

Pour comprendre comment évolue un « satellite artificiel », imaginons que nous lançons un objet en direction de l'horizon. Sous l'effet de son poids, ou plus précisément sous l'effet de la force de gravitation terrestre, celui-ci retombe un peu plus loin sur le sol. Si nous le lançons plus fort, il retombe plus loin. Si nous le lançons de plus haut, il retombe également plus loin.

Considérons maintenant la courbure de la surface terrestre, puisque nous sommes à la surface d'une sphère, qui explique que l'horizon se dérobe en permanence quand nous nous déplaçons en ligne droite. Si l'objet est lancé suffisamment fort, la distance dont il tombe après avoir parcouru 10 km correspond à la courbure de la surface du globe sur 10 km. L'objet se trouve en perpétuelle chute vers un sol qui ne cesse de se dérober : on dit que l'objet est « satellisé », ou placé en orbite terrestre.

La figure 1.4 illustre ce principe de mise en orbite des satellites terrestres.

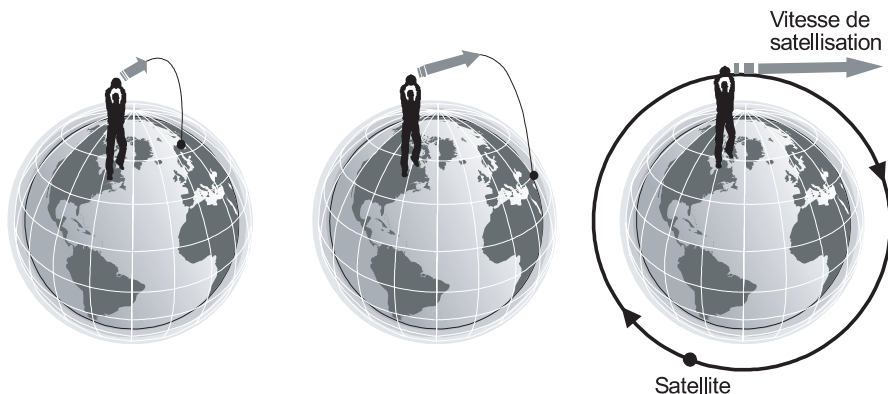


Figure 1.4

*Principe de mise en orbite d'un satellite autour de la Terre*

La mise en orbite consiste donc avant tout à donner au satellite une vitesse suffisamment importante. Il existe une vitesse minimale de satellisation, qui permet au satellite de compenser la hauteur de sa chute, sur une période donnée, par la courbure de la Terre le long de sa trajectoire sur cette même période. À une altitude nulle (cas théorique), cette vitesse minimale est de 7,9 km/s, soit 25 000 km/h.

De façon plus réaliste, si une fusée lance cet objet depuis une altitude où l'atmosphère terrestre n'est pas susceptible de le freiner, c'est-à-dire supérieure à environ 200 km, et à une vitesse équivalente à 7,9 km/s, alors cet objet se trouve transformé en satellite artificiel de la Terre. Le rôle de la fusée est de donner au satellite de l'altitude, mais aussi et surtout la vitesse horizontale suffisante à sa mise en orbite.

Une fois mis en orbite, le satellite survole la surface terrestre et fait le tour de la planète en permanence. Le temps qu'il met pour faire le tour du globe dépend de son altitude : plus le satellite est bas, plus il tourne vite ; plus il est haut, plus il met de temps.

Voici quelques exemples du temps mis par un satellite à faire le tour de la Terre :

- Satellite d'observation à 800 km d'altitude : fait le tour du globe en une heure quarante environ.
- Satellite de navigation à 20 000 km d'altitude : fait le tour du globe en douze heures environ (douze heures pour le GPS, quatorze heures pour Galileo).
- Satellite géostationnaire à 36 000 km d'altitude : fait le tour du globe en un jour exactement, soit au même rythme que la rotation de la Terre autour d'elle-même.

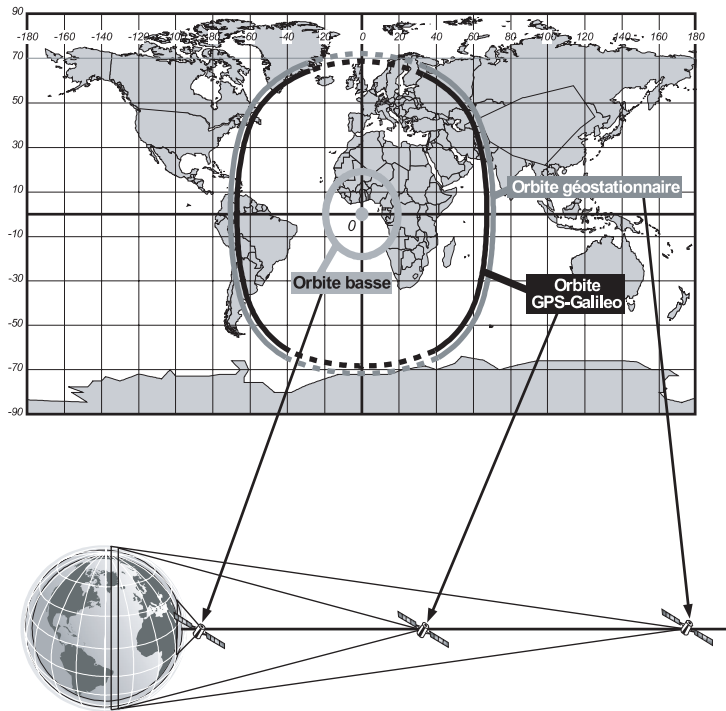
L'altitude du satellite détermine non seulement la durée nécessaire pour faire un tour complet du globe (la période orbitale), mais aussi la taille de la zone de surface terrestre qu'il couvre. Un satellite géostationnaire (36 000 km d'altitude) offre une couverture permanente sur près d'un tiers de la surface du globe, alors qu'un satellite d'observation en orbite basse à 800 km d'altitude ne couvre qu'une portion d'un continent.

La figure 1.5 illustre les zones de couverture d'un satellite géostationnaire, d'un satellite GPS ou Galileo et d'un satellite en orbite basse. Nous constatons que les satellites GPS et Galileo offrent une couverture presque équivalente aux satellites géostationnaires, alors qu'ils sont à une altitude presque deux fois moins importante. La raison à cela est que si la zone de couverture varie beaucoup en fonction de l'altitude pour les orbites basses, en s'éloignant de la Terre, elle n'augmente que très peu avec l'altitude.

Considérons maintenant le point de vue de l'utilisateur qui observe un satellite. La vitesse du satellite autour de la Terre combinée à la vitesse de rotation de la Terre d'un tour par jour autour d'elle-même et à la zone qu'il couvre déterminent le temps maximal pendant lequel le satellite reste visible de l'utilisateur. C'est le temps dit « de visibilité ».

Ce temps peut varier de l'ordre de dix minutes pour les satellites en orbite basse à plus de quatre heures pour un satellite GPS ou Galileo, et jusqu'à une visibilité permanente pour un satellite géostationnaire.



**Figure 1.5**

*Exemples de zones géographiques couvertes par les satellites*

Un satellite seul ne peut donc couvrir en permanence qu'une partie du globe, alors que certaines applications, comme les télécommunications ou l'observation de la Terre, ont des exigences de couverture mondiale et quasi permanente.

Les constellations de satellites sont apparues pour répondre aux besoins grandissant des applications spatiales. Ainsi, des constellations de satellites de télécommunications géostationnaires à 36 000 km d'altitude (trois satellites couvrant l'ensemble du globe, à l'exception des très hautes latitudes) et de satellites d'observation ou de télécommunications en orbite basse (aux environs de 1 000 km d'altitude) ont vu le jour.

La constellation de satellites GPS est une des plus importantes des constellations jamais mises en orbite. Elle est constituée de 24 satellites en orbite à environ 20 200 km d'altitude. Pour ce qui est de Galileo, la constellation sera déployée à 23 200 km d'altitude et comprendra un total de 30 satellites.

Les caractéristiques des constellations GPS et Galileo sont un aspect essentiel de la conception de ces systèmes. Parmi les nombreux critères qui entrent en jeu, les suivants sont les plus importants et ont conduit aux choix des paramètres de ces constellations (les