

Une fois superposées, ces séquences binaires de code et de message de navigation sont utilisées par le satellite pour moduler le signal de la porteuse, ce qui permet de transmettre l'ensemble des informations à tous les récepteurs en visibilité.

Performances et sources d'erreur

L'intérêt grandissant pour les applications fondées sur le GPS et Galileo est très fortement lié à la qualité du service de positionnement offert par ces systèmes. Cette qualité de service s'exprime sous la forme d'un ensemble de paramètres, qui caractérisent les performances offertes aux usagers.

Plusieurs phénomènes physiques et facteurs techniques ont un effet sur ces performances. Nous présentons dans ce chapitre les différentes sources d'erreur qui déterminent la précision du positionnement et de la synchronisation des récepteurs.

Les performances

La performance du service de positionnement est un élément primordial pour l'ensemble des applications utilisant le GPS et Galileo. En effet, le champ des applications possibles est très variable selon les performances offertes et garanties. De plus, le type de performance recherché est très variable en fonction des applications. Ainsi, les applications de transport, par exemple aérien ou maritime, pour lesquelles des vies sont en jeu, exigent une précision instantanée, de l'ordre du mètre à quelques dizaines de mètres, mais aussi et surtout une fiabilité à toute épreuve. À l'inverse, les applications scientifiques ou géodésiques utilisent des récepteurs statiques et peuvent recourir à des calculs de moyennes ou de comparaisons sur des durées importantes pour obtenir des précisions de l'ordre de quelques centimètres.

Afin de caractériser les performances des systèmes de navigation pour cet ensemble très varié d'applications, il faut recourir à plusieurs paramètres, dont nous présentons ci-après les principaux.

La précision de service

La précision de service caractérise l'écart entre la position donnée par un récepteur GPS ou Galileo et sa vraie position. C'est la performance la plus communément considérée par les utilisateurs.

On distingue généralement :

- La précision de positionnement horizontale, qui est, par exemple, directement associée à l'erreur de positionnement sur une carte.

- La précision de positionnement verticale, qui est essentielle, par exemple, à la navigation aérienne.
- La précision temporelle, c'est-à-dire la précision avec laquelle le temps de référence GPS ou Galileo est restitué à l'utilisateur par le récepteur.

La précision de positionnement varie d'un instant à un autre en fonction des variations des différentes sources d'erreur, comme nous le verrons un peu plus loin dans ce chapitre. C'est pour cela que la précision de positionnement doit être exprimée de façon statistique, c'est-à-dire en analysant un grand nombre de positions successives fournies par un récepteur.

Prenons l'exemple d'un récepteur classique donnant à l'utilisateur une position toutes les secondes et restant immobile pendant 100 s. Nous pouvons tracer sur une carte l'ensemble des positions fournies par le récepteur durant ces 100 s, ce qui ressemble à un nuage de points.

La figure 1.15 donne un exemple théorique de nuage de points et de paramètres de précision associés.

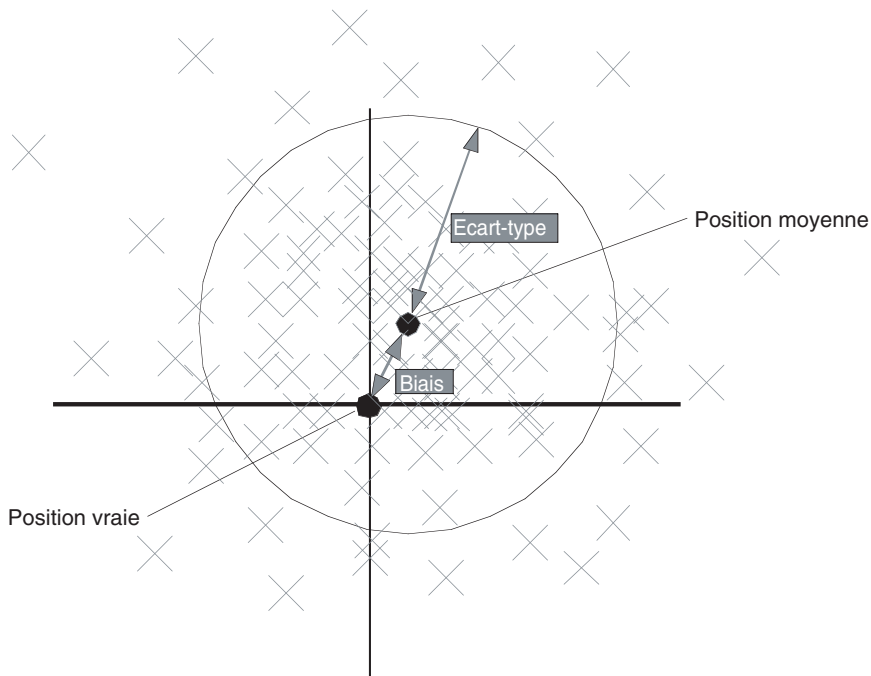


Figure 1.15

Précision du positionnement horizontal

À partir de ce nuage de points, nous pouvons déterminer :

- Une position moyenne (le centre du nuage de points). On appelle « biais de positionnement » l'écart entre cette position moyenne et la position vraie.
- La dispersion du nuage de points par rapport à cette position moyenne. Cette dispersion peut se caractériser par la valeur de « l'écart type », représenté par la lettre σ . Plus la dispersion du nuage de points est importante, c'est-à-dire plus la variation de l'erreur de positionnement d'un instant à un autre est importante, plus l'écart type est important.

Nous pouvons caractériser la précision de positionnement par le biais et par l'écart type. Nous pouvons également caractériser la précision de positionnement par une mesure de la dispersion du nuage de points par rapport à la position vraie, l'écart type se calculant par rapport à la position moyenne.

Nous utilisons pour cela un calcul donnant une valeur statistique RMS (Root Mean Square), qui caractérise la dispersion de positionnement en incluant la valeur du biais.

Généralement, la valeur du biais des systèmes GPS et Galileo est beaucoup plus faible que celle de l'écart type. Nous caractérisons donc la précision de positionnement par la valeur de l'écart type ou par la valeur RMS, qui sont sensiblement égales.

Les précisions RMS horizontales offertes par les systèmes de navigation par satellite peuvent aller typiquement d'une valeur de l'ordre de 1 à 2 m — en utilisant, par exemple, des systèmes d'augmentation de performances régionaux, comme EGNOS — à des valeurs dégradées de l'ordre de 100 m — cas du GPS lorsque le DOD (Department of Defense) américain active le dispositif de dégradation volontaire, dit SA (Selective Availability).

Intégrité et continuité du service

Les systèmes de navigation sont utilisés pour des applications dans lesquelles la sécurité des personnes est engagée. C'est le cas notamment des équipements et services de transport aérien, maritime ou ferroviaire. Ces utilisateurs ont un besoin impératif d'informations de positionnement précises et fiables.

Cette fiabilité se caractérise par les deux types de performances suivantes :

- **Intégrité.** L'utilisateur a besoin d'une garantie que l'information de positionnement estimée par son récepteur est bonne et qu'aucune erreur ne s'est glissée dans le système au point de dégrader la précision de positionnement au-delà d'une certaine

tolérance sans qu'il en ait été averti. Cette garantie de la précision du positionnement est appelée *intégrité du service*. On imagine aisément les conséquences d'une erreur de positionnement sur l'atterrissage automatique d'un avion si cette erreur devait rester non détectée.

- **Continuité.** Lorsque l'utilisateur s'engage dans une opération de transport pour laquelle il utilise le positionnement GPS ou Galileo comme moyen de navigation — par exemple, un avion en phase d'atterrissage automatique, ou un bateau engagé dans une opération d'accostage assistée par navigation automatique —, il lui faut une assurance que ce service de positionnement ne sera pas interrompu avant la fin de son opération. Cette capacité du système de navigation à maintenir le service de positionnement sans interruption pendant une période donnée est appelée *continuité du service*. On imagine là encore aisément les difficultés qui pourraient survenir en cas d'interruption du service de navigation pour un avion en phase d'atterrissage automatique.

L'intégrité et la continuité du service sont donc des performances essentielles attendues des systèmes GPS et Galileo par les applications pour lesquelles la sécurité des personnes ou des produits est engagée.

Ces performances peuvent également être exprimées par des valeurs statistiques. Ainsi, l'intégrité s'exprime sous la forme d'une probabilité d'erreur du système sur une période donnée. Les performances ultimes recherchées par les systèmes de navigation par satellite sont de l'ordre d'une chance sur dix millions d'avoir une erreur du système sur une période d'une heure.

La continuité peut être exprimée par la probabilité d'interruption du service de positionnement sur une période donnée. Les performances ultimes recherchées par les systèmes de navigation par satellite sont de l'ordre d'une chance sur cent mille d'avoir une interruption du service sur une période de deux minutes trente (durée typique d'un atterrissage). Notons que les interruptions de service volontaires, planifiées, et pour lesquelles les usagers sont informés suffisamment à l'avance, ne sont pas considérées comme des pertes de performance de continuité du service.

La disponibilité du service

Les services de navigation globaux tels que le GPS et Galileo doivent pouvoir être disponibles en tout lieu et à tout instant, à la demande de l'utilisateur. Or certains événements ou conditions spécifiques de l'environnement de l'utilisateur peuvent conduire à une indisponibilité du service. Des opérations inopinées de maintenance sur les satellites pourraient, par exemple, conduire à une perte de précision, voire à une perte de service. Ou encore, un utilisateur ayant des satellites masqués, par exemple,

par des immeubles, pourrait perdre la disponibilité du service pendant la durée de ces masquages.

La performance de disponibilité établit, là encore de façon statistique, la probabilité en un lieu donné d'avoir accès au service de positionnement.

Cette performance est une caractéristique essentielle de la valeur économique des services offerts par le GPS et Galileo. Un utilisateur ne peut être satisfait de l'achat d'un produit de navigation globale que si ce dernier est disponible en permanence et en tout lieu.

Effets de la géométrie des satellites et des masquages

Dans les systèmes de navigation GPS ou Galileo, différentes sources d'erreur contribuent à dégrader la précision du positionnement.

Cette précision dépend de deux contributions principales :

- la géométrie de la constellation ;
- les erreurs dans la mesure de distance entre le satellite et le récepteur.

Nous allons tout d'abord aborder les effets de la géométrie, caractérisés par le facteur « DOP ».

La dilution de précision, ou DOP (Dilution of Precision)

Nous pouvons considérer en première approximation que la précision de positionnement est proportionnelle aux erreurs de mesure de distance et à un facteur géométrique, nommé DOP (Dilution of Precision), soit, de façon simplifiée :

Précision de positionnement = DOP × erreurs de mesure de distance

Nous détaillons dans les sections suivantes les différentes sources des erreurs de mesure de distance.

Concernant le DOP, il convient de distinguer le VDOP (DOP vertical), le HDOP (DOP horizontal) et le TDOP (DOP temporel) :

- Précision de positionnement vertical = VDOP × erreurs de mesure de distance
- Précision de positionnement horizontal = HDOP × erreurs de mesure de distance
- Précision de restitution du temps = TDOP × erreurs de mesure de distance

Le DOP caractérise en fait, à un instant donné et en un lieu donné, la géométrie de la constellation telle que peut la voir un récepteur. Ce DOP varie d'un instant à un autre en fonction des différents mouvements des satellites les uns par rapport aux autres et par rapport à l'utilisateur.

La figure 1.16 fournit, à travers un résultat de simulation, un exemple de variation du DOP en fonction du temps.

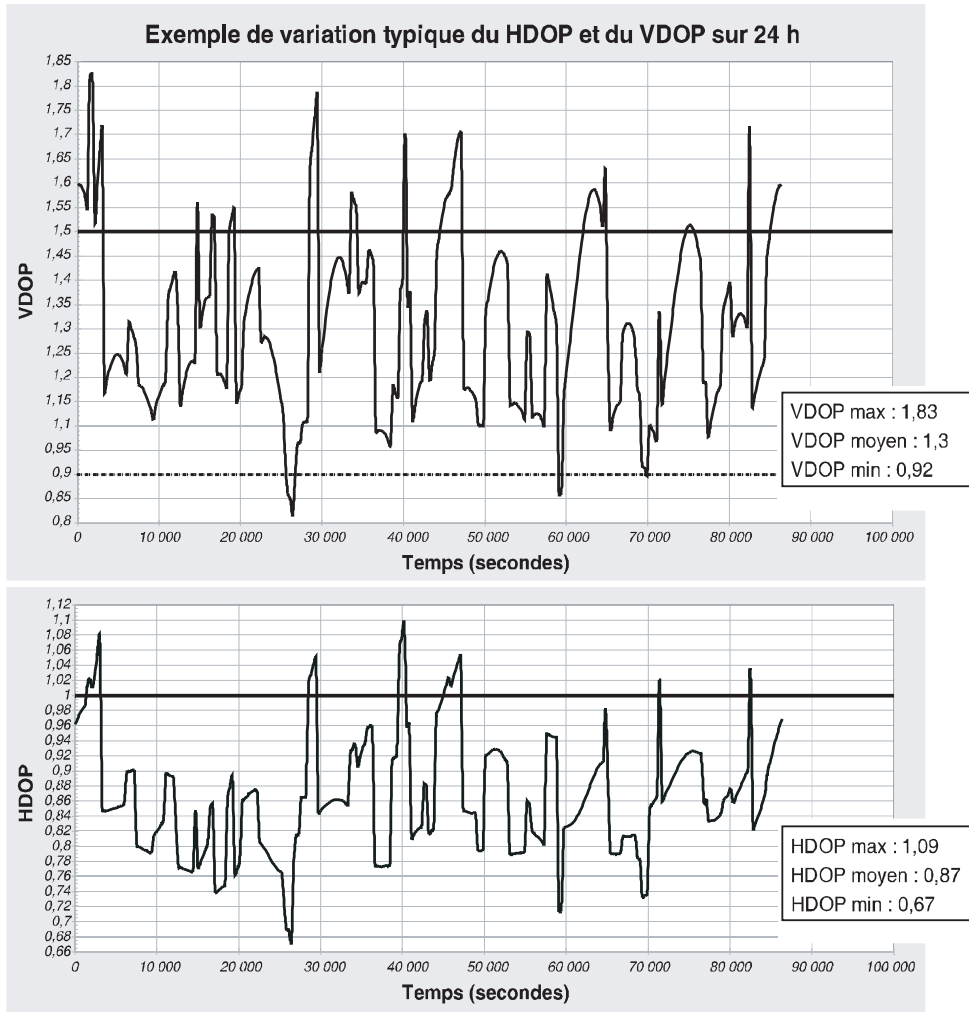


Figure 1.16

Variations typiques du DOP en fonction du temps pour la constellation GPS

(source Alcatel Alenia Space)

Variations du DOP

Afin de comprendre les raisons de ces variations du DOP, imaginons deux configurations géométriques extrêmes et leurs effets sur la précision du positionnement :

- **Configuration A.** Tous les satellites sont très proches les uns des autres et proches de la verticale du lieu de l'utilisateur. Dans une telle configuration, le récepteur dispose de plusieurs mesures dans l'axe vertical de sa position, ce qui lui assure une bonne précision de positionnement vertical. Par contre, l'absence de mesures dans les dimensions horizontales conduit à une forte indétermination de la position horizontale de l'utilisateur. De larges variations de la position de ce dernier dans le plan horizontal ne se traduiront que par de très faibles variations des mesures de distance par rapport aux satellites placés à la verticale. Cette forte indétermination conduit à une dégradation, ou dilution, de la précision de positionnement horizontal.

La figure 1.17 illustre un exemple de configuration défavorable à un positionnement horizontal précis.

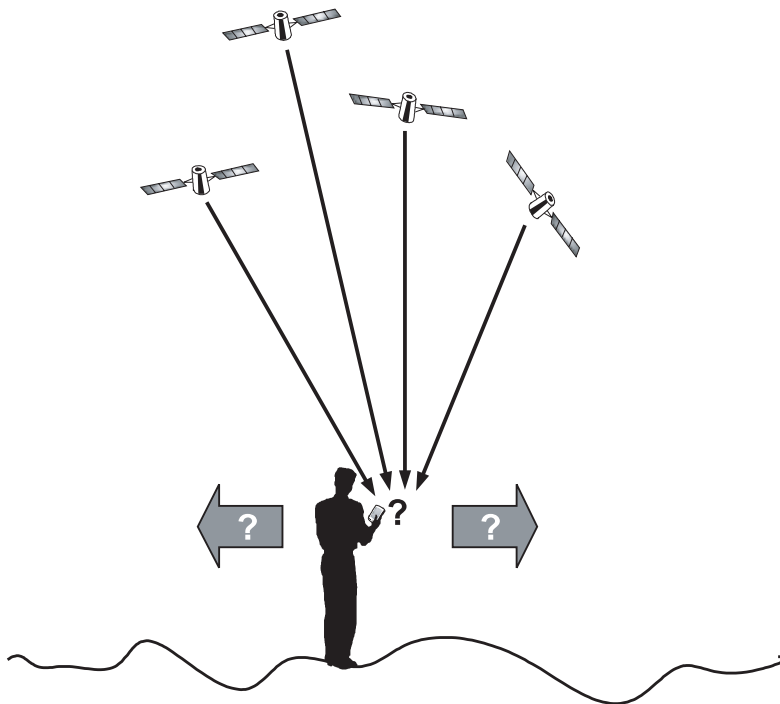


Figure 1.17

Configuration géométrique défavorable au positionnement horizontal

- **Configuration B.** Imaginons à l'inverse que tous les satellites visibles par l'utilisateur soient très bas sur l'horizon. Dans une telle configuration, le récepteur dispose de plusieurs mesures dans le plan horizontal, qui lui assurent un positionnement horizontal précis. Par contre, n'ayant pas de mesure dans la direction verticale, le positionnement selon l'axe vertical sera très indéterminé, et le VDOP (précision de positionnement en altitude) sera dégradé.

La figure 1.18 donne un exemple de configuration défavorable à un positionnement vertical précis.

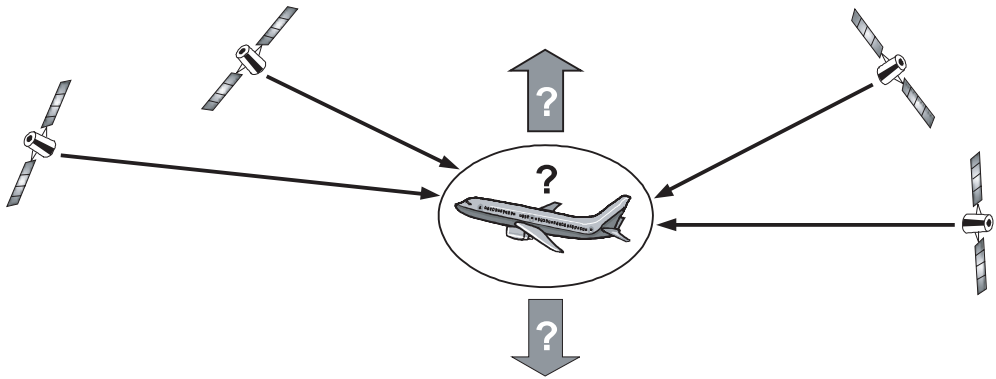


Figure 1.18

Configuration géométrique défavorable au positionnement vertical

L'influence de la dilution de précision sur la qualité du service de navigation est très importante, et l'on observe de fortes variations de précision du fait de ces effets géométriques.

C'est la raison pour laquelle le choix des caractéristiques des constellations GPS et Galileo a été soumis à de nombreuses études approfondies afin d'optimiser les valeurs du DOP sur l'ensemble du globe. Il est également nécessaire, au cours de la durée de vie du système, de veiller au bon remplacement des satellites défectueux afin d'éviter toute dégradation des propriétés géométriques de la constellation.

La figure 1.19 présente le résultat d'une simulation sur l'ensemble du globe, réalisée avec la constellation GPS, permettant d'observer les variations du DOP en fonction des zones géographiques.

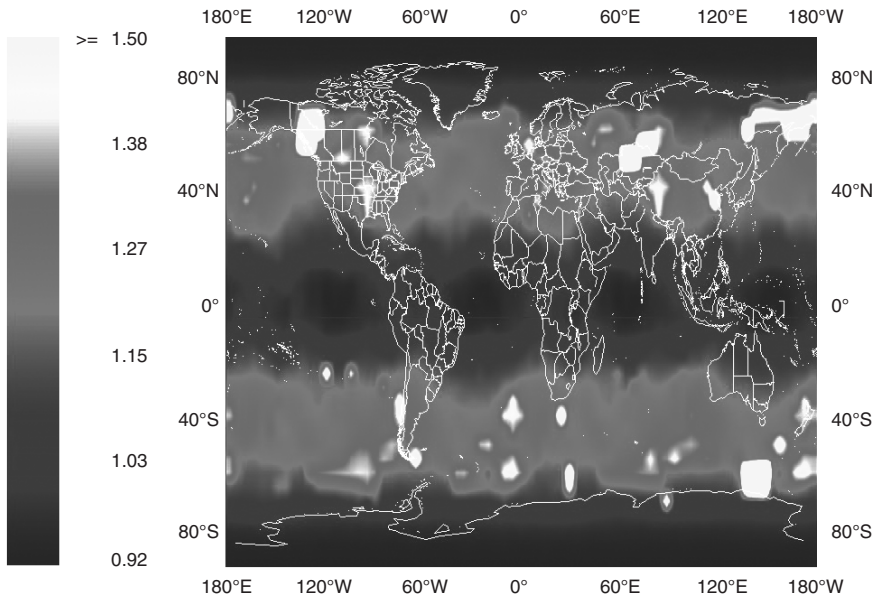


Figure 1.19

Répartition de la dilution de précision sur le globe pour la constellation GPS
(source Alcatel Alenia Space)

Effets de masquage

Si les caractéristiques de la constellation déterminent en grande partie la qualité du DOP, il en va de même pour les effets liés à l'environnement immédiat de l'utilisateur.

Les signaux GPS et Galileo sont très fortement atténués dès lors qu'ils doivent traverser un milieu différent que l'air, tels des murs. L'utilisateur peut donc se retrouver en des lieux où certains satellites présents au-dessus de l'horizon sont en réalité masqués par des obstacles. Cette perte de visibilité de certains satellites dégrade le DOP disponible pour l'utilisateur et la précision du service.

Reprenons l'exemple de la configuration A, qui illustre les effets des masquages des satellites en environnement urbain. Dans des rues étroites bordées d'immeubles, les récepteurs GPS ou Galileo sont privés de mesures provenant des satellites situés en position basse sur l'horizon. Nous observons en ce cas une dégradation du HDOP et, par voie de conséquence, de la précision du positionnement horizontal.

La figure 1.20 donne un exemple de situation de masquage, dans lequel le DOP est dégradé à cause des obstacles entourant le récepteur utilisateur.

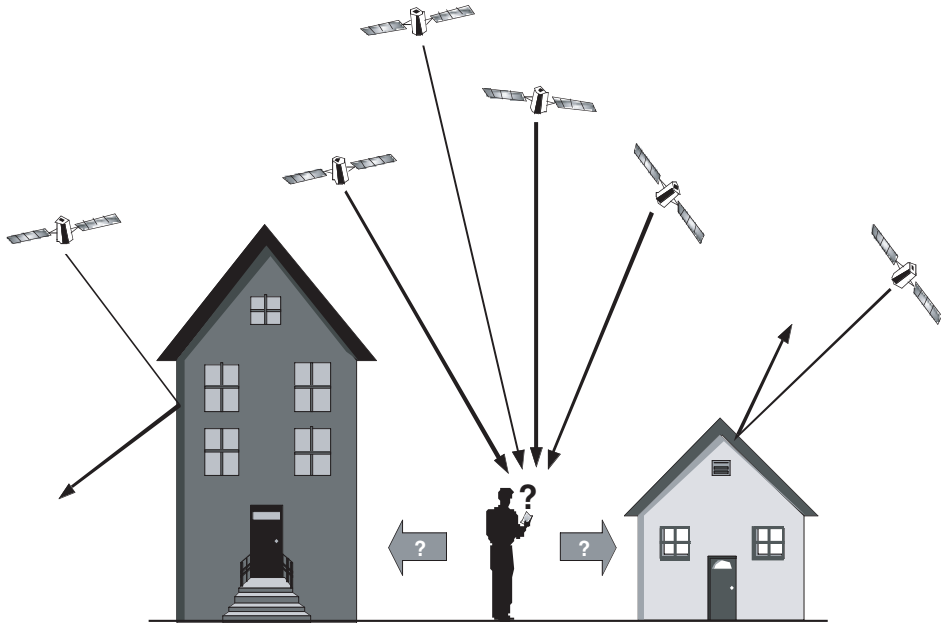


Figure 1.20

Effets des masquages sur la dégradation du HDOP

Outre le facteur géométrique et les masquages, les différentes erreurs affectant la position du satellite ou la mesure de distance entre le récepteur et le satellite contribuent directement à l'imprécision du positionnement. Ces erreurs peuvent avoir des origines multiples, que nous détaillons dans les sections suivantes.

Positionnement des satellites

Nous avons vu que, dans le principe de positionnement par satellite, le récepteur usager avait besoin de connaître la position des satellites dont il utilise le signal pour déterminer sa position. Cette information de position est fournie à l'usager par le satellite lui-même, grâce aux messages de navigation qu'il diffuse dans son signal.

Ces informations de position des satellites doivent permettre à tous les usagers de calculer, à tout instant de mesure, la position précise des satellites qu'ils utilisent. Or le satellite se déplace à une vitesse de l'ordre de 4 km/s, c'est-à-dire qu'il parcourt 4 m en un millièm

de seconde. Comme la précision de positionnement des satellites que nous recherchons est de l'ordre du mètre, nous concevons bien que le satellite ne puisse diffuser quelque 4 000 positions successives par seconde. Il diffuse donc un ensemble de paramètres, qui permettent à l'utilisateur de calculer lui-même la position du satellite à l'instant désiré. On appelle ces paramètres les éphémérides des satellites.

Cependant, ces paramètres sont entachés d'erreurs, qui se traduisent par des erreurs de positionnement de l'utilisateur lorsque celui-ci utilise les éphémérides pour calculer sa position.

La figure 1.21 illustre les effets d'une erreur de positionnement d'un satellite sur la mesure de distance qui lui est associée. Remarquons que cette erreur dépend de la situation du récepteur utilisateur par rapport à la direction dans laquelle se trouve l'erreur de positionnement du satellite.

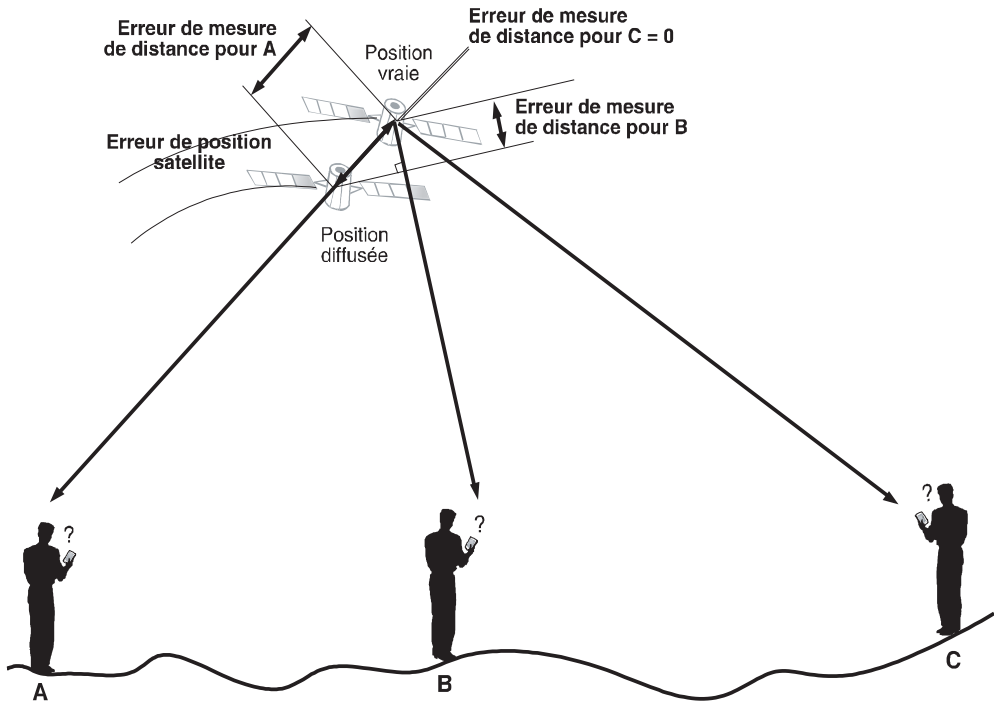


Figure 1.21

Effets des erreurs de positionnement des satellites

En fait, ces éphémérides ne sont pas élaborées par le satellite lui-même, mais sont calculées au niveau du segment sol des systèmes GPS et Galileo. C'est en fonction de la performance

de ces infrastructures au sol que la précision de positionnement des satellites peut être déterminée.

Les moyens à mettre en place au sol pour atteindre les performances recherchées sont assez importants. Il s'agit de déterminer la position d'environ 30 objets orbitant autour du globe à une vitesse de 4 000 m/s à 20 000 km d'altitude. Cette position doit être prédite plusieurs heures à l'avance. En effet, le satellite n'étant pas en contact permanent avec le sol pour recevoir les dernières éphémérides calculées, il doit utiliser des éphémérides qui auront été prédites plusieurs heures auparavant et enregistrées par le satellite lors de son dernier contact avec les stations au sol.

De nombreux paramètres peuvent entacher d'erreurs les éphémérides calculées au sol. Les mouvements des satellites autour de la Terre sont soumis à de multiples perturbations, comme l'attraction de la Lune ou du Soleil, les effets du vent solaire — flux de particules émises par le Soleil et venant frapper la surface du satellite —, ou bien encore les effets des différences de relief ou de gravité de notre planète.

La recherche d'une précision de l'ordre de 1 m sur la position des satellites, ce qui est le cas de Galileo et des futures évolutions du GPS, exige la mise en œuvre de nombreuses stations de mesures, réparties à la surface du globe, ainsi que de puissants calculateurs estimant les effets des différentes perturbations sur les mouvements des satellites.

Synchronisation des satellites

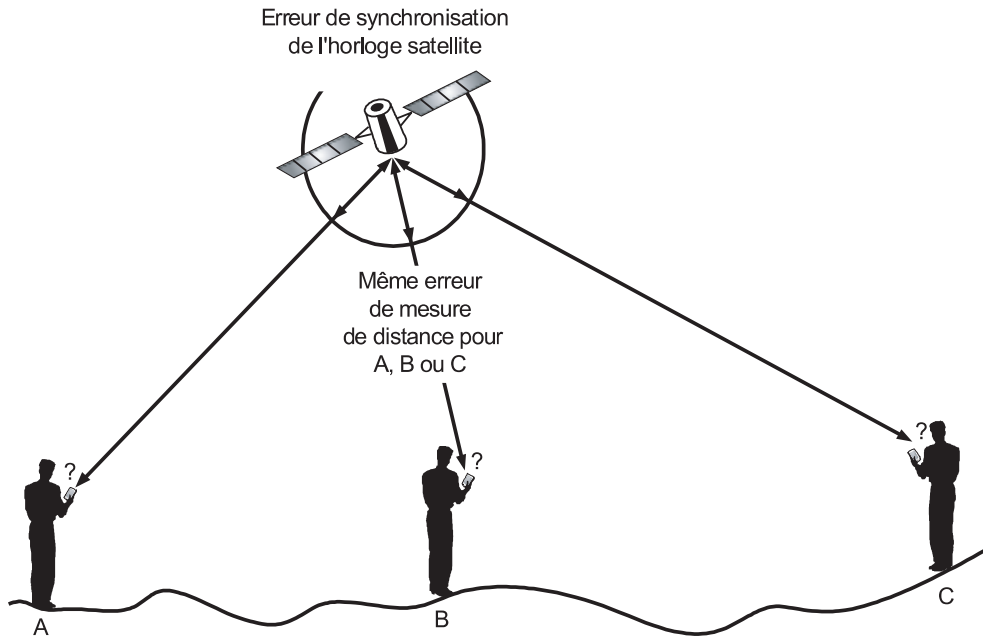
Comme expliqué précédemment, le principe du positionnement par satellites demande que les signaux des satellites utilisés par le récepteur usager afin de déterminer sa position soient parfaitement synchronisés par rapport à une référence de temps commune, appelée « temps système ».

Toute erreur de synchronisation d'un satellite par rapport à ce temps système se traduit directement par une erreur de calcul de la distance séparant le récepteur du satellite. Le récepteur utilise en ce cas des mesures de distance qui positionnent les satellites plus près ou plus loin qu'ils ne le sont en réalité.

La figure 1.22 illustre l'effet d'une erreur de synchronisation d'un satellite sur la mesure de distance qui lui est associée. Remarquons que cette erreur est la même pour tous les récepteurs utilisant ce satellite.

Les horloges des satellites doivent donc être maintenues parfaitement synchronisées par rapport à une horloge de référence installée dans les centres de contrôle au sol.

Imaginons que nous parvenions à synchroniser parfaitement une horloge embarquée sur un satellite par rapport à l'horloge de référence au sol. Tout comme nos montres finissent par prendre de l'avance ou du retard, les horloges embarquées à bord des satellites se désynchronisent lentement par rapport au temps de référence maintenu au sol.

**Figure 1.22**

Effets des erreurs de synchronisation des horloges des satellites

La première condition pour maintenir la synchronisation des satellites est donc d'embarquer des horloges, ou *oscillateurs*, les plus stables possibles. On parle d'horloges ultra-stables.

Pour ne pas dégrader de façon excessive la performance du positionnement, nous recherchons une précision de positionnement de l'ordre du mètre. Les erreurs de désynchronisation ne doivent donc pas conduire à des erreurs de calcul de distance de plus de quelques centimètres.

Nous avons vu qu'une erreur de 1 m sur le calcul de distance correspondait à une erreur de synchronisation de l'ordre de 3 ns (nanoseconde), soit trois milliardièmes de seconde. Il s'agit donc de mettre en place des horloges qui gardent une stabilité de l'ordre de 0,1 ns entre les contacts successifs du satellite avec le centre de contrôle au sol, autrement dit des horloges qui ne prennent qu'une seconde d'avance ou de retard au bout de trois cents ans.

Pour comprendre comment l'évolution de la technologie a permis d'atteindre de telles précisions, il est intéressant de revenir sur les principes de la mesure du temps.

Principes de la mesure du temps

La mesure du temps repose sur la mise en place d'un système, appelé oscillateur, fournissant des oscillations avec une très grande régularité. C'est par la mesure du nombre des battements de ce système oscillant que l'on mesure l'écoulement du temps.

La vitesse de rotation de la Terre autour d'elle-même fournit une référence oscillante facilement accessible. C'est la raison pour laquelle elle a longtemps été utilisée comme standard de référence de la mesure du temps. Ce mouvement de rotation de la Terre autour d'elle-même n'est toutefois pas parfaitement régulier et connaît des variations de l'ordre du millième de seconde par jour. La référence à la rotation terrestre était encore utilisée du temps des horloges pendulaires, car la précision de la mesure du temps sur un jour réalisée à partir des battements des pendules correspondait à peu près aux irrégularités de la variation de la vitesse de rotation terrestre.

Avec l'apparition de sources oscillantes beaucoup plus stables, comme les vibrations d'un cristal de quartz, il est apparu que la rotation terrestre ne pouvait plus être utilisée comme standard. L'utilisation des horloges à quartz a permis de faire un bond gigantesque en multipliant par 1 000 la précision de la mesure du temps. Ces horloges permettent de mesurer l'écoulement du temps avec une précision inférieure à un milliardième de seconde de décalage par jour.

Horloges atomiques

Cela n'est cependant toujours pas suffisant pour les systèmes de navigation par satellite, qui doivent encore être mille fois plus précis que les horloges à quartz. Une telle précision est devenue possible avec les horloges dites *atomiques*. Ces horloges utilisent les propriétés de certains matériaux au niveau de leurs atomes, exploitant les oscillations de ces atomes entre différents niveaux d'énergie. On utilise pour cela des éléments primaires, comme le césium, le rubidium ou encore l'hydrogène. De telles horloges atteignent des précisions de mesure du temps inférieures à un milliardième de seconde par jour.

Le tableau 1.1 récapitule les erreurs de synchronisation des différents types d'horloges rapportées au temps qu'elles mettent à perdre une seconde. La stabilité des horloges est aussi généralement caractérisée par le ratio $\Delta f/f$, qui représente la variation de la fréquence d'oscillation en une journée rapportée à la fréquence de l'oscillateur.

Tableau 1.1 – Stabilité et erreurs de synchronisation de différents types d'oscillateurs

Type d'horloge	Stabilité $\Delta f/f$ par jour	Durée avant de perdre 1 s (en années)
Quartz	10^{-9}	30
Rubidium	10^{-12}	30 000
Césium	10^{-13}	300 000
Hydrogène	10^{-14}	3 000 000

La construction d'horloges atomiques pour des applications spatiales est devenue une réalité avec la mise en place du système GPS. Plusieurs fabricants américains, russes et européens bénéficiant des travaux de nombreux laboratoires scientifiques et soutenus par les administrations concernées, militaires comme civiles, ont su relever le défi technologique que constituait la mise au point de telles horloges, fonctionnant dans des conditions extrêmes et présentant une masse et une consommation d'énergie suffisamment faibles pour être embarquées à bord des satellites.

Effets de la précision des horloges sur le positionnement

La stabilité des horloges actuelles ne suffit pas tout à fait à assurer le maintien de la synchronisation de nos satellites. En effet, si nous voulons assurer une erreur de positionnement de 1 m au niveau du récepteur usager, il faut préalablement assurer que l'erreur combinée en temps et en position des satellites GPS/Galileo est inférieure à 1 m (Galileo s'est donné pour objectif une performance temps et position des satellites de 65 cm). Or, une dérive de un milliardième de seconde en un jour conduit à une erreur de 1 m de la mesure de distance en trois jours.

À l'aide d'un réseau de stations déployées au sol dans des centres de contrôle GPS ou Galileo et écoutant les signaux des satellites, il est possible d'estimer la dérive des horloges embarquées et de calculer ainsi des paramètres de correction des horloges. Ces derniers vont donner l'avance ou le retard de chaque horloge des satellites par rapport au temps de référence.

Ces paramètres, qui sont réévalués en permanence, sont ensuite envoyés au satellite à échéance régulière. Ce dernier les diffuse aux récepteurs usagers par le biais des messages de navigation transmis dans son signal.

Ces opérations de calcul de *correction d'horloge* doivent être effectuées très régulièrement, de façon à communiquer tout aussi régulièrement, idéalement tous les jours, les dernières corrections à chaque satellite. C'est le rôle dévolu aux opérateurs au sol et à l'infrastructure sol de contrôle.

Erreurs de mesure de distance

La mesure de distance effectuée par le récepteur entre lui-même et le satellite repose sur l'hypothèse que le signal émis par le satellite se propage en ligne droite et à la vitesse constante de la lumière.

Cela n'est pas tout à fait le cas dans la réalité, car certains phénomènes viennent perturber cette situation idéale, conduisant à des erreurs de mesure, qui, à leur tour, dégradent la précision du positionnement.

Effets atmosphériques

L'atmosphère est constituée de plusieurs couches d'air superposées. Chaque couche a des propriétés de température et de composition physique différentes, mais relativement homogènes à l'intérieur d'une même couche.

On peut établir une première différenciation de ces couches selon leurs variations de températures. La première couche, celle où nous vivons, est appelée *troposphère*. Son épaisseur est d'environ 10 à 12 km, sa température diminuant régulièrement avec l'altitude. La couche suivante, dite *stratosphère*, voit la température remonter légèrement jusqu'à environ 50 km d'altitude. Dans la troisième couche, ou *mésosphère*, qui atteint 80 à 85 km, la température décroît à nouveau. Plusieurs autres couches se succèdent, qui ont chacune des températures différentes.

Pour les systèmes de navigation par satellite, on ne retient que les effets de propagation dans la stratosphère et la troposphère, dits « effets troposphériques ». En effet, l'essentiel de la masse de l'atmosphère se trouvant dans les altitudes inférieures à 40 km, on considère que les effets troposphériques sont négligeables au-delà de cette altitude.

L'atmosphère possède d'autres propriétés susceptibles de varier en fonction de l'altitude, notamment la composition de l'air. Plus on s'élève, plus la densité de l'air diminue, c'est-à-dire que le nombre d'atomes et de molécules dans un volume donné baisse.

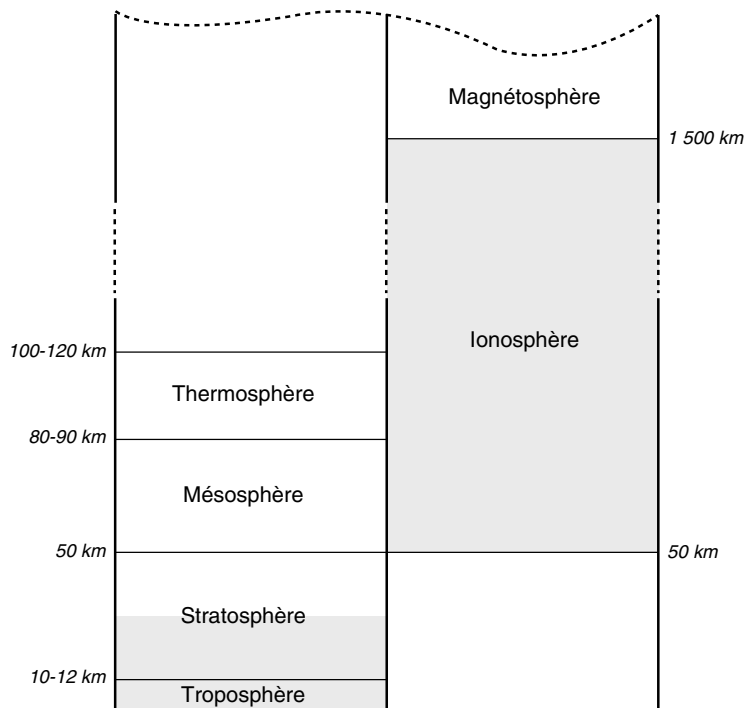
Par ailleurs, les molécules sont soumises aux rayonnements en provenance de l'espace, en particulier aux rayonnements ultraviolets du Soleil. Les effets de ces rayonnements conduisent certaines molécules et atomes à se dissocier, libérant des électrons dits libres. Ce phénomène est appelé *ionisation*, et l'on parle d'ionosphère pour les régions de l'espace comprises entre environ 50 et 1 500 km d'altitude.

Les effets ionosphériques prennent la forme d'électrons libres qui perturbent la propagation des signaux GPS et Galileo. Ces phénomènes d'ionisation sont en fait extrêmement variables suivant la région du globe considérée, le champ magnétique terrestre et les variations de l'activité et du rayonnement solaires.

La figure 1.23 illustre la décomposition de l'atmosphère et des couches troposphériques et ionosphériques qui perturbent la propagation des signaux GPS et Galileo.

Figure 1.23

Les couches de l'atmosphère



Erreurs liées aux effets ionosphériques

L'un des effets les plus surprenants de l'ionosphère sur la propagation des signaux GPS ou Galileo est que l'onde porteuse et sa modulation (le code) voyagent à des vitesses différentes. La vitesse de propagation du code ralentit et devient légèrement plus faible que la vitesse de la lumière. En se souvenant de notre exemple de train roulant à une vitesse réelle plus faible que celle que l'on pensait, nous comprenons que la mesure de la distance apparaisse supérieure à ce qu'elle est dans la réalité. La cause de ce décalage est appelée *délai ionosphérique*.

Le délai ionosphérique dépend essentiellement de deux paramètres : la fréquence du signal et la densité d'électrons libres dans l'ionosphère.

Le tableau 1.2 donne des exemples de délais ionosphériques pour différentes fréquences et pour deux états de l'ionosphère, « calme » et « excité ».

Tableau 1.2 – Erreurs de mesures de distance dues aux effets ionosphériques

Fréquence du signal	Ionosphère « calme »	Ionosphère « excitée »
100 MHz	40 m	4 km
Fréquences GPS/Galileo	30 cm	30 m
10 GHz	4 mm	40 cm

De telles erreurs ne permettant pas d'atteindre la précision de quelques mètres exigée par le GPS et Galileo, il faut mettre en place des systèmes de correction d'erreur.

Il existe deux systèmes correctifs, suivant que les récepteurs utilisent une ou deux fréquences :

- Récepteurs utilisant une seule fréquence (cas des récepteurs grand public GPS, qui n'utilisent que la fréquence L1, en accès libre) : un modèle est utilisé pour corriger le délai ionosphérique grâce à des paramètres transmis par les satellites GPS ou Galileo dans leurs messages de navigation. Ces corrections permettent de diviser par deux les erreurs liées aux effets ionosphériques. Les performances des récepteurs monofréquence sont susceptibles d'être dégradées de plusieurs mètres ou dizaines de mètres par les perturbations ionosphériques.
- Récepteurs utilisant deux fréquences (cas des récepteurs militaires GPS, qui utilisent les fréquences L1 et L2) : il est possible de comparer les effets ionosphériques entre ces deux fréquences et d'en déduire des corrections éliminant totalement les erreurs ionosphériques. Les performances des récepteurs bifréquence ne sont pas dégradées par les effets ionosphériques.

Erreurs liées aux effets troposphériques

Lors de la traversée des couches basses de l'atmosphère, la troposphère, les signaux GPS et Galileo paraissent parcourir un chemin plus long que la ligne droite géométrique reliant le récepteur et le satellite. Ce phénomène est appelé *réfraction*. Le chemin parcouru paraissant plus long, la mesure de distance entre le récepteur et le satellite est supérieure à la réalité.

La réfraction est à son minimum quand le satellite est à la verticale de l'utilisateur, avec une erreur troposphérique de l'ordre de 2 m, et à son maximum quand le satellite est au plus bas sur l'horizon, avec une erreur allant jusqu'à 30 m pour un satellite à 5 degrés au-dessus de l'horizon. Ces erreurs dépendent en outre de la température, de l'humidité de l'air, de la pression atmosphérique et, bien entendu, de l'altitude.

Le délai troposphérique est le même pour toutes les fréquences. Il n'est donc pas possible de le corriger en utilisant deux fréquences différentes, contrairement au délai ionosphérique. Les récepteurs utilisent à la place des modèles dits de compensation de délais troposphériques, qui permettent d'estimer ces délais et de corriger les mesures de distance. Les erreurs résiduelles après application de ces compensations sont généralement inférieures à quelques dizaines de centimètres.

Effets des multitrajets et des interférences

Après leur propagation à travers les différentes couches de l'atmosphère, les signaux GPS et Galileo sont captés par des antennes et traités par des *corrélateurs* implémentés au sein des récepteurs.

La fonction d'un corrélateur est de reproduire les séquences de code générées par le satellite et de les faire coïncider avec les séquences de code reçues dans le signal. Grâce à cette opération de corrélation, le récepteur peut déterminer le temps d'arrivée de chaque séquence de code par rapport à son horloge locale, et ainsi effectuer sa mesure de distance.

L'opération de corrélation peut cependant être perturbée par des signaux parasites, provenant d'interférences ou de multitrajets.

- **Interférences.** Comme les récepteurs radio, les récepteurs GPS et Galileo peuvent être brouillés par la réception de signaux parasites, émis à des fréquences proches des fréquences GPS et Galileo. C'est le cas, par exemple, de certains radars ou systèmes de repérage au sol utilisés dans la navigation aérienne. Les effets des interférences sont très variables et peuvent induire des erreurs dans la mesure de distance de l'ordre du mètre ou conduire à la perte momentanée de réception du signal.
- **Multitrajets.** On parle de multitrajet quand un même signal en provenance d'un satellite GPS ou Galileo est capté plusieurs fois par le récepteur. Cela peut se produire

lorsque les signaux se réfléchissent sur des surfaces environnantes et sont captés par le récepteur après leur réflexion, en plus du signal reçu directement depuis le satellite. Le corrélateur du récepteur reçoit alors une superposition de signaux présentant le même code, mais décalés dans le temps (les signaux réfléchis ont parcouru une plus grande distance et sont donc retardés) et de puissances différentes (les signaux réfléchis sont toujours plus atténués). Cela se traduit par une distorsion de l'opération de corrélation, plus ou moins importante selon la puissance et le retard du signal réfléchi, les caractéristiques de l'antenne et celles du récepteur.

La figure 1.24 illustre la géométrie des multitrajets dans l'environnement du récepteur utilisateur.

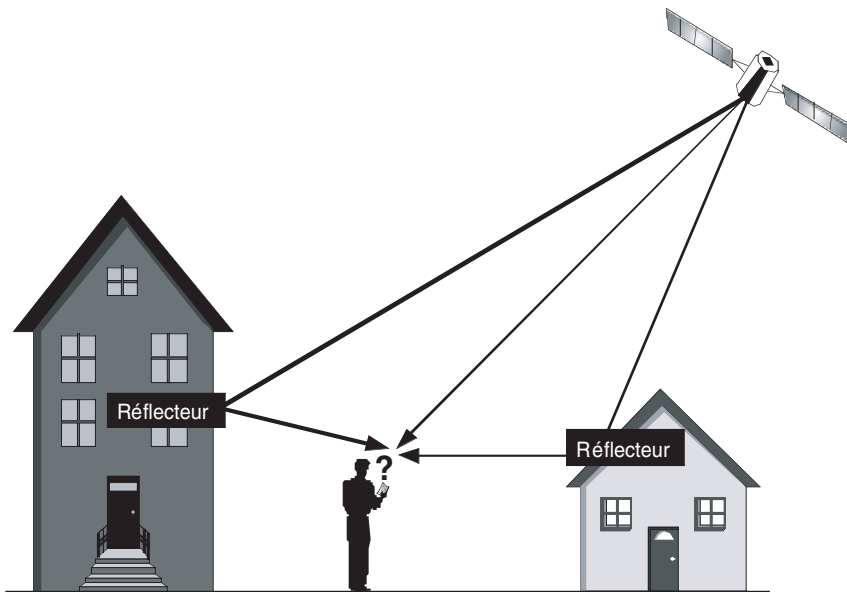


Figure 1.24

Les multitrajets

En règle générale, les réflexions provenant de signaux de satellites situés très bas sur l'horizon sont peu atténuées et peu retardées, engendrant des effets de multitrajets importants et rendant délicate l'exploitation des mesures en provenance de ces satellites. Les surfaces réfléchissantes peuvent être le sol, la mer, des toits, des bâtiments, des arbres, etc. Les erreurs de mesures de distances provoquées par les multitrajets peuvent atteindre plusieurs mètres.

Cartes et référentiels

Pour conclure notre aperçu des performances des systèmes GPS et Galileo et offrir une vision complète du principe de positionnement par satellite, il est important de bien comprendre la référence utilisée par la localisation GPS ou Galileo, en d'autres termes, par rapport à quoi cette localisation nous permet de nous positionner.

Prenons un exemple de localisation GPS pris au hasard sur un site Internet :

1,483 60 ; 43,631 69

Excepté certaines applications spécifiques, cette information brute n'apporte généralement pas grand-chose à l'utilisateur. Ce dernier cherche à se positionner par rapport à des lieux dont la position est connue et dans un environnement géographique décrit sur une carte. Il lui est donc essentiel de pouvoir rapprocher sa position GPS ou Galileo de positions GPS ou Galileo fournies par cette carte.

L'exemple de localisation ci-dessus, qui correspond à l'emplacement d'un grand magasin à Toulouse, ne peut être représenté sur une carte que si chaque repère (rue, immeuble, etc.) de cette carte est également associé à une position GPS ou Galileo.

Les récepteurs ont donc besoin d'une large base de données fournissant les coordonnées GPS ou Galileo de chaque élément cartographique affiché à l'utilisateur.

Nous comprenons aisément que toute erreur dans ces bases de données se traduit, vu de l'utilisateur, par une erreur de positionnement entre la réalité de la position indiquée par son récepteur et la position du lieu recherché sur la carte.

Si certaines zones de la surface terrestre sont cartographiées très précisément, chaque lieu géographique étant parfaitement positionné dans le référentiel GPS ou Galileo, il n'en va pas de même pour de larges zones peu fréquentées. C'est l'objet du développement de bases de données géographiques, ou GIS (Geographic Information System), que de viser à recenser tous les lieux et informations géographiques dans une zone ou la totalité de la surface terrestre, associés à leurs coordonnées GPS/Galileo précises.

Dans notre exemple de position, le premier nombre (1,483 60) correspond à la longitude, et le second (43,631 69) à la latitude.

Remarquons le nombre important de chiffres après la virgule : le dernier chiffre correspond à dix millionnièmes de degrés de latitude, c'est-à-dire à environ 1 m.

Lorsque nous manipulons des positions géographiques d'une telle précision, nous utilisons en fait une référence, appelée *référentiel géodésique*. En effet, les systèmes géodésiques utilisés historiquement pour la cartographie diffèrent d'un pays à un autre.

La constitution de ces systèmes géodésiques locaux s'appuie sur un modèle de surface terrestre raccordé à la surface réelle en un ou plusieurs points de référence connus. Le modèle de surface terrestre utilisé est dit *ellipsoïde* et correspond à une sphère légèrement aplatie aux pôles afin de mieux représenter la véritable forme de la surface terrestre.

Les coordonnées en longitude, latitude et altitude sont déterminées par rapport à cet ellipsoïde de référence.

La figure 1.25 illustre le principe de constitution d'un référentiel géodésique local, constitué d'un ellipsoïde de référence raccordé à la surface terrestre au niveau d'un point de référence.

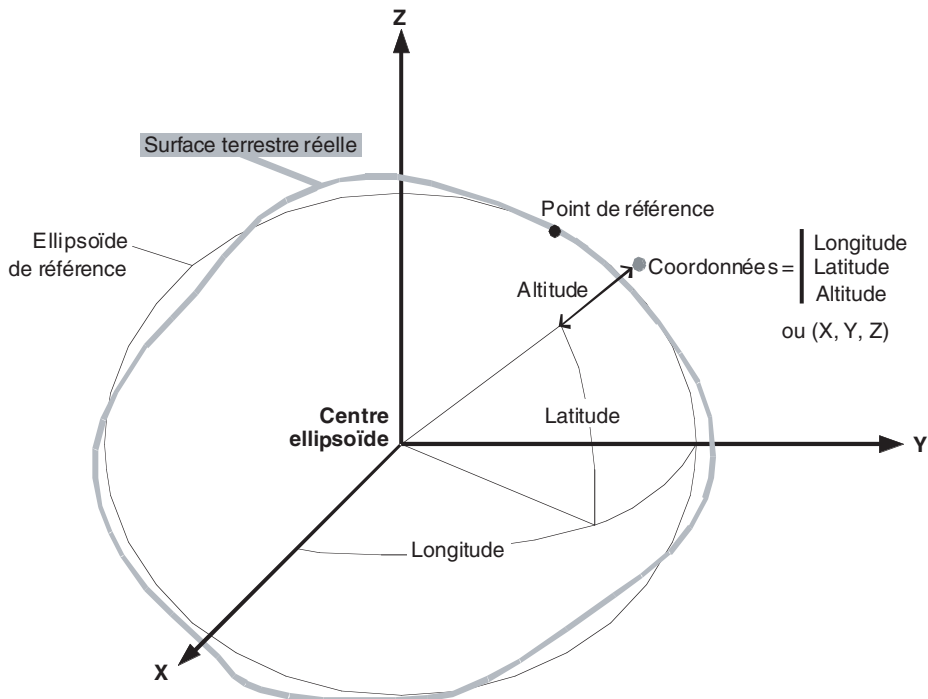


Figure 1.25

Référentiel géodésique local

Développé dans la seconde moitié du XX^e siècle, le système historique français, dit NTF (nouvelle triangulation de la France), s'appuie notamment sur un point de référence fondamental défini par « la croix du Panthéon », à Paris.

La mise en place du système GPS a imposé l'avènement d'un autre type de système géodésique, dit spatial, appelé système WGS-84. Ce système WGS (World Geodetic System) a été réalisé par le département de la Défense américain à partir des positions de bases propres au système GPS et de constantes fondamentales. Toutes les coordonnées GPS prennent leur signification dans ce système géodésique.

Les écarts entre des coordonnées en référentiel NTF et des coordonnées en référentiel WGS-84 peuvent aller jusqu'à 300 m.

Le système Galileo est pour sa part associé à un modèle géodésique spatial spécifique, appelé GTRF (Galileo Terrestrial Reference Frame), établi à partir des positions de référence des stations du réseau sol Galileo.

Afin d'unifier ces différents systèmes géodésiques, l'organisme IERS (International Earth Rotation and Reference Systems Service) établit et gère un système géodésique international, nommé ITRF (International Terrestrial Rotation Frame), à partir de multiples mesures provenant du GPS et d'autres systèmes géodésiques.

Certains mécanismes mathématiques simples permettent de transformer des coordonnées fournies dans un système géodésique donné vers des coordonnées ITRF, et *vice versa*.

Les systèmes géodésiques WGS-84 et ITRF coïncident à moins de 10 cm près. Il en sera de même du système géodésique Galileo, le GTRF, qui coïncidera avec l'ITRF à quelques centimètres près.

Les systèmes GPS et Galileo sont donc conçus pour fournir des positions compatibles à moins d'un mètre près. Les champs d'application de la localisation par satellite utilisant GPS et Galileo ne cesseront de s'élargir du fait du développement de bases de données géographiques et cartographiques de plus en plus précises.

Conclusion

Nous avons pu explorer dans ce premier chapitre les principes de fonctionnement des systèmes de navigation par satellite, ainsi que les différents facteurs qui déterminent leur performance, et au final, la qualité du service de positionnement et de synchronisation fourni à l'utilisateur.

Nous avons également mis en évidence que, par conception, ces systèmes pouvaient avoir un nombre illimité d'utilisateurs sur Terre et ainsi servir de base à un développement sans contrainte de multiples applications.

Nous abordons aux chapitres 2 et 3 les différents types de récepteurs utilisateur ainsi que les applications qui utilisent GPS et Galileo.