

caractéristiques plus précises des constellations GPS et Galileo sont détaillées dans les chapitres suivants) :

- Altitude des satellites (20 200 km pour GPS et 23 200 km pour Galileo) : comme nous l'avons vu, l'altitude des satellites détermine directement la zone couverte et la durée de visibilité d'un satellite depuis un utilisateur au sol. Dans le cas de GPS et de Galileo, le choix d'une altitude trop basse nécessiterait de déployer un nombre trop important de satellites pour couvrir l'ensemble du globe par au moins quatre satellites en permanence. Une altitude trop élevée entraînerait pour sa part une augmentation de la puissance et de la masse des satellites, pour un très faible gain en zone de couverture, comme l'illustre la figure 1.5.
- Nombre de satellites (24 pour GPS, 30 pour Galileo) : il est déterminé de façon à assurer la performance recherchée sur l'ensemble du globe. Au moins quatre satellites doivent être visibles de tout point du globe pour fournir un service de positionnement. Un nombre plus important de satellites offre de meilleures performances, en particulier dans les zones urbaines, où certains satellites peuvent être masqués par des immeubles.
- Inclinaison du plan des orbites par rapport à l'équateur : ce paramètre influence directement la visibilité par les usagers des hautes latitudes. Les satellites GPS décrivent une orbite inclinée de 55° par rapport à l'équateur et les satellites Galileo de 56° (Galileo offre donc une couverture légèrement meilleure aux latitudes élevées).

La figure 1.6 illustre ce paramètre sur une orbite inclinée.

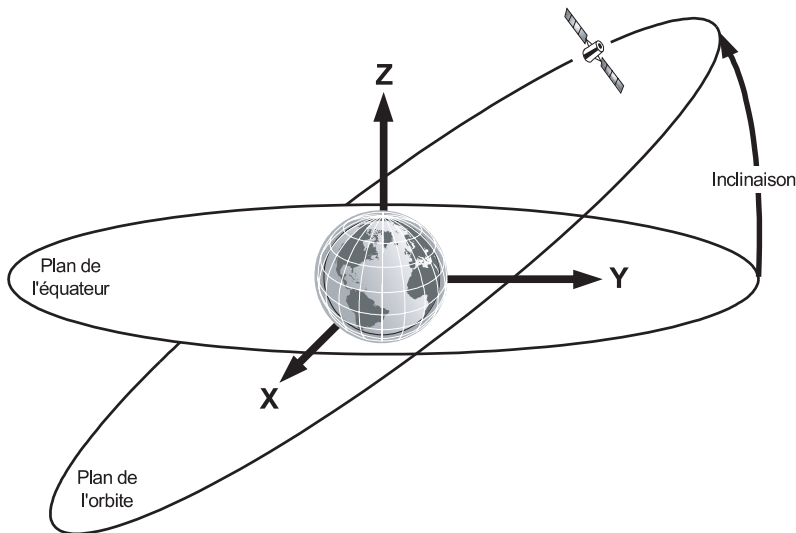


Figure 1.6

Inclinaison de l'orbite des satellites

- Répartition des satellites dans l'espace : influence directement les performances du service mais également le nombre de lancements nécessaires au déploiement puis au remplacement des satellites. Les satellites sont disposés dans différents plans orbitaux (6 plans orbitaux de 4 satellites pour le GPS, 3 plans orbitaux de 10 satellites pour Galileo), autorisant le lancement de multiples satellites dans un plan avec un seul lanceur.

La figure 1.7 illustre la répartition dans l'espace des satellites de la constellation Galileo.

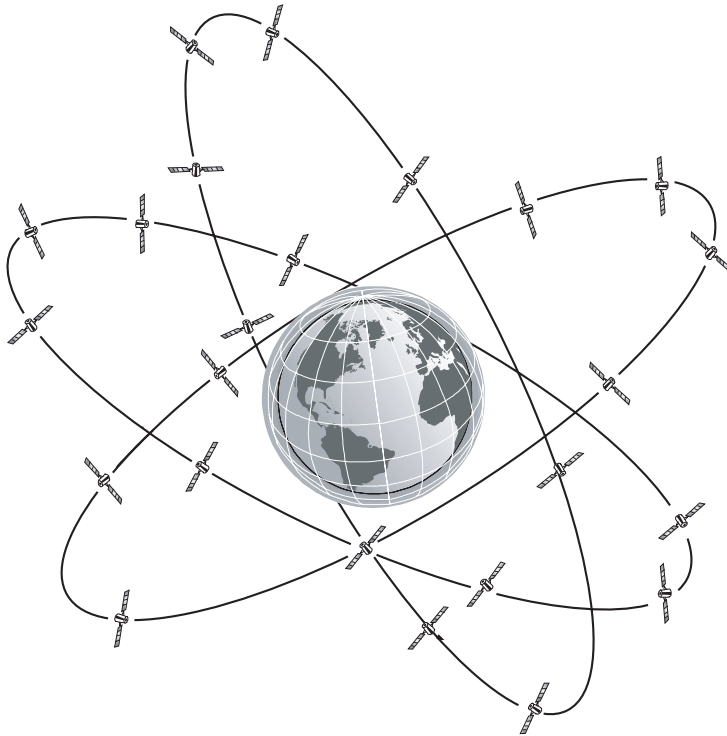


Figure 1.7

La constellation Galileo

Une constellation de satellites peut donc être définie comme un ensemble de satellites évoluant dans l'espace avec une disposition bien déterminée. C'est ce qu'on appelle la « géométrie » de la constellation.

La mise en place de la constellation demande un soin particulier pour obtenir un positionnement initial des satellites (à la fin du lancement) en conformité avec les caractéristiques précises de la géométrie de la constellation.

Pendant toute la durée où le service de positionnement est fourni, le maintien de cette géométrie demande un contrôle permanent de l'état des satellites, lesquels peuvent tomber en panne, sans compter que leur durée de vie est limitée. C'est le rôle des opérateurs du système depuis les centres de contrôle au sol que d'effectuer ces contrôles.

Signal et mesure de distance

Les satellites GPS et Galileo émettent des signaux générés à partir de leurs émetteurs embarqués. Ces signaux sont de même nature que les ondes hertziennes de diffusion radio AM/FM ou TV, les signaux radars ou la lumière : il s'agit d'ondes électromagnétiques qui se propagent dans l'espace à la vitesse de la lumière.

Nous pouvons nous représenter la propagation de ces ondes dans l'espace depuis le satellite comme de petites vagues à la surface de l'eau.

L'onde électromagnétique peut être caractérisée indifféremment par l'un ou l'autre des paramètres suivants :

- Sa fréquence (mesurée en hertz), qui représente le nombre d'oscillations mesurées en un point fixe pendant une seconde.
- Sa longueur d'onde (mesurée en mètre), qui représente la distance entre deux crêtes successives de l'ondulation.

Les signaux électromagnétiques sont généralement caractérisés et référencés par la fréquence qu'ils utilisent. C'est ainsi qu'une radio AM ou FM est caractérisée par sa fréquence d'émission. Il est important de contrôler et réguler l'ensemble des émissions d'ondes électromagnétiques, car l'émission de plusieurs ondes sur des fréquences proches a pour effet de perturber leur propagation, les ondes interférant les unes avec les autres et perdant leurs caractéristiques de base.

C'est pourquoi les différents émetteurs de signaux électromagnétiques se voient attribuer des fréquences bien précises par les autorités nationales de régulation.

Il en va de même pour les systèmes spatiaux. Compte tenu de leur couverture mondiale, les fréquences qu'ils utilisent sont déterminées par les autorités mondiales de régulation des télécommunications. Certaines fréquences sont réservées aux systèmes de navigation par satellites comme GPS et Galileo. Elles se situent dans la bande de fréquences dite UHF (Ultra-High Frequency), et plus particulièrement dans la bande dite « L ». Il s'agit de fréquences plus élevées que celles utilisées par les radios FM (situées autour de 100 MHz) et les émetteurs de diffusion TV, mais moins élevées que les fréquences radar.

La figure 1.8 illustre la position des fréquences GPS et Galileo parmi les différentes familles de fréquences référencées.

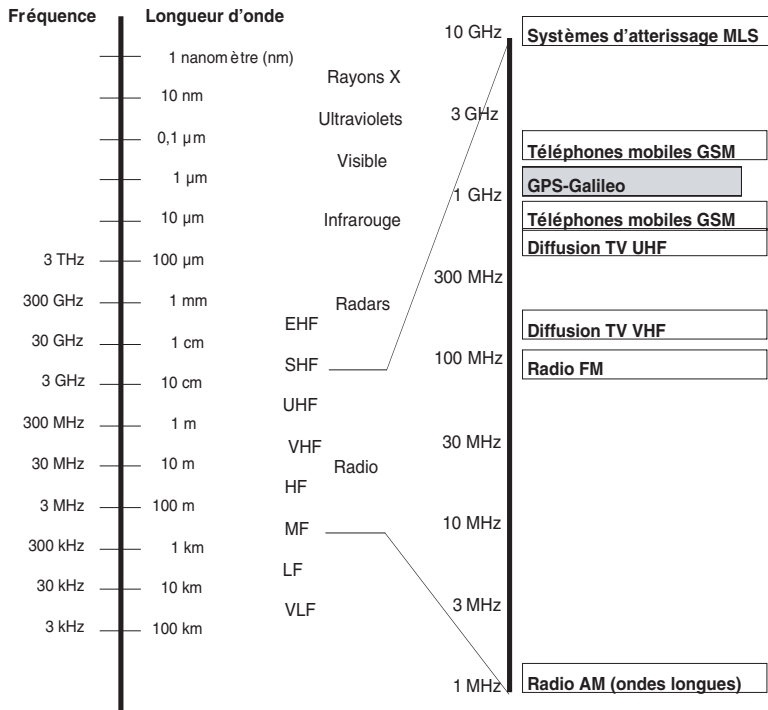


Figure 1.8

Fréquences utilisées par le GPS et Galileo

Modulation des signaux GPS et Galileo

Chaque satellite GPS transmet trois signaux différents utilisant trois bandes de fréquences centrées sur les valeurs suivantes :

- L1 : 1 575,42 MHz
- L2 : 1 227,60 MHz
- L5 : 1 176,45 MHz

Chaque satellite Galileo transmet également trois signaux différents utilisant trois bandes de fréquences centrées sur les valeurs suivantes :

- L1 : 1 575,42 MHz
- E6 : 1 278,75 MHz
- E5 : 1 191,795 MHz

Chacun de ces signaux est construit à partir d'un signal dit « de base », aussi appelé « porteuse ». Il s'agit d'une onde pure de fréquence égale à environ 1 500 MHz. Cela représente un nombre d'un milliard cinq cents millions d'oscillations électromagnétiques par seconde. La longueur d'onde de cette porteuse est d'environ 20 cm.

La figure 1.9 illustre cette onde porteuse.

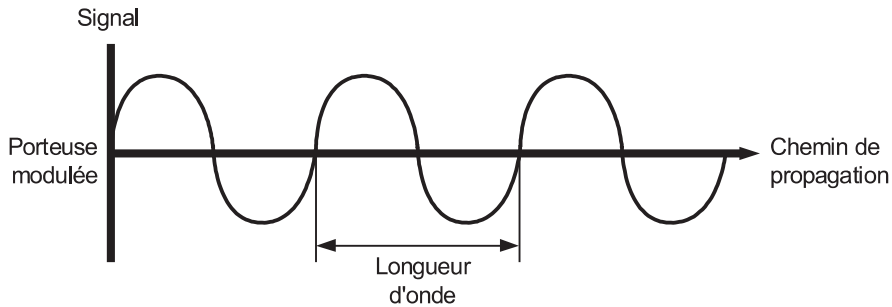


Figure 1.9

Onde porteuse des signaux GPS et Galileo

Un tel signal permet d'établir un lien entre chaque satellite — qui émet son signal à partir d'une source oscillante — et l'ensemble des récepteurs qui captent cette onde quand ils écoutent cette fréquence particulière.

Cependant, ce lien seul ne permet ni de transmettre une information de temps (le « bip » que nous avons décrit précédemment et qui permet au récepteur de réaliser sa mesure de distance au satellite), ni de transmettre les informations nécessaires au récepteur pour calculer sa position et la position du satellite.

Pour transmettre une information à travers ce signal, il faut donc ajouter d'autres signes. Ces signes sont des modifications du signal de base, appelées « modulations ». Ces modulations peuvent être observées par le récepteur et être utilisées pour transporter de l'information entre le satellite et les récepteurs.

Il existe différents types de modulations. On peut, par exemple, modifier la fréquence, en augmentant ou diminuant le nombre d'oscillations par seconde. C'est ce qu'on appelle la « modulation de fréquence », une technique utilisée par les radios FM (Frequency Modulation). Dans ce cas, l'émetteur module (modifie) la fréquence de l'onde porteuse de base en fonction de l'information qu'il veut transmettre. De son côté, le récepteur détecte ces variations de fréquences et peut ainsi restituer l'information transmise par l'émetteur. Il est aussi possible de modifier l'amplitude de l'onde porteuse. C'est ce qu'on appelle la modulation d'amplitude, utilisée par les radios AM (Amplitude Modulation).

Les satellites GPS et Galileo utilisent pour leur part la « modulation de phase » pour transmettre leurs informations. L'émetteur transmet son information sans changer la fréquence, mais en introduisant des sauts dans les oscillations de l'onde. Le récepteur peut détecter ces sauts et recomposer l'information de l'émetteur.

Le type d'information qui peut être transmis par un saut de phase est très élémentaire. Par exemple, la présence d'un saut indique une information « 1 », et l'absence de saut une information « 0 ». On peut donc transmettre une information binaire, ou digitale (le « digit » vaut 0 ou 1), qui est la forme sous laquelle toutes les informations sont stockées dans les mémoires informatiques.

En résumé :

- Le satellite établit un lien avec chaque récepteur en transmettant une onde pure (la porteuse) à une fréquence bien précise, captée et reconnue par chaque récepteur.
- Le satellite mémorise des informations sous forme binaire (des 0 et des 1) et les transmet à tous les utilisateurs en modulant la porteuse par des sauts de phase.
- Chaque récepteur détecte ces sauts et peut ainsi reconstituer l'information sous forme également binaire.

La figure 1.10 illustre le principe de transmission des données binaires par utilisation de la modulation de phase.

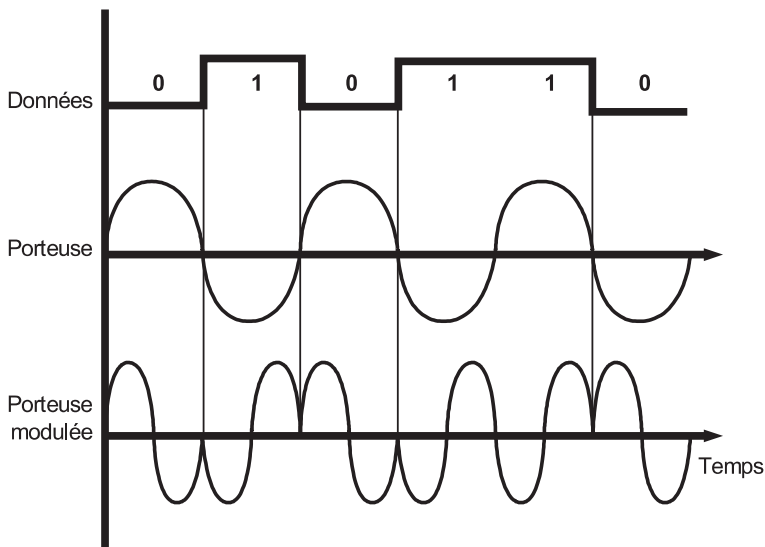


Figure 1.10

La modulation de phase

Étant de conception plus récente que le GPS, Galileo a pu bénéficier de techniques de modulation plus modernes. Appelées BOC (Binary Offset Carrier) ces modulations utilisent également les sauts de phase, mais avec un nombre plus grand d'états possibles de la phase et des sauts associés.

Maintenant que nous avons vu comment un satellite pouvait transmettre de l'information aux récepteurs des usagers, rappelons-nous que chaque récepteur doit recevoir les signaux d'au moins quatre satellites simultanément, chacun d'eux utilisant la même fréquence. Comment dès lors garantir que les récepteurs accèdent à ces signaux multiples sans interférer entre eux ? C'est le rôle du code des signaux GPS ou Galileo.

Code des signaux GPS et Galileo

Puisque chaque récepteur reçoit en même temps, sur une même fréquence, plusieurs signaux provenant de plusieurs satellites, il lui faut un moyen pour reconnaître et différencier chaque signal. La technique utilisée pour cela par le GPS et par Galileo est appelée CDMA (Code Division Multiple Access), ou accès multiple par division de code.

Dans le CDMA, chaque satellite se voit attribuer un code particulier, qu'il utilise pour moduler son signal. Ces codes ne sont en fait que des séquences de bits, 0 et 1, qui peuvent être générées de façon prédéterminée et indépendante par les satellites GPS et Galileo et par chaque récepteur. Les récepteurs, qui connaissent également ces codes, peuvent les identifier et séparer les différents signaux arrivant sur la même bande de fréquences.

Ces codes sont caractérisés par leur taux, c'est-à-dire le nombre de bits transmis par seconde, et leur longueur, c'est-à-dire la durée au bout de laquelle le code reprend une nouvelle séquence.

Un autre avantage apporté par ces codes est qu'il est possible d'en contrôler l'accès par les utilisateurs, ce qui permet de développer des applications de type militaire, par exemple le service PPS (Precise Positioning Service) du GPS, dont le code est réservé aux utilisateurs habilités, et des applications de type commercial (le service commercial de Galileo est situé sur la fréquence E6 et utilisera un code dont l'accès sera contrôlé). Seuls les usagers habilités ou abonnés ont accès à une « clé » permettant de générer le code à l'identique du satellite et donc de « décoder » le signal.

Ainsi, les signaux GPS ont plusieurs codes :

- Le code dit C/A (Clear Access), en libre accès. Émis à une fréquence de 1,023 million de bits, ou chips, par seconde, il a une longueur de 1 milliseconde. Cela signifie qu'en une seconde, le satellite transmet 1 000 séquences de code complètes.

- Le code dit P (Precision), réservé aux forces armées américaines, qui permet d'accéder aux meilleures performances du GPS. Émis à une fréquence dix fois plus élevée que le code C/A, il nécessite une semaine pour la transmission de la séquence complète du code.

Les signaux Galileo sont également conçus pour avoir plusieurs codes (*voir le chapitre 5 pour leur présentation détaillée*) :

- Les codes en accès libre, qui ont des caractéristiques semblables au code C/A du GPS mais utilisent des techniques de modulation plus modernes.
- Le code PRS (Public Regulated Service), réservé aux applications gouvernementales et militaires.
- Le code CS (Commercial Service), réservé aux applications commerciales à accès restreint (payant).

Ces codes modifient le signal de la porteuse en y introduisant des sauts de phase. Dans le cas du code C/A du GPS, ces sauts de phase peuvent être introduits environ tous les millièmes de seconde. Cela représente un saut pour environ 1 500 oscillations de la porteuse.

La figure 1.11 illustre comment le code GPS C/A est introduit sous forme de modulation de la porteuse L1 du GPS.

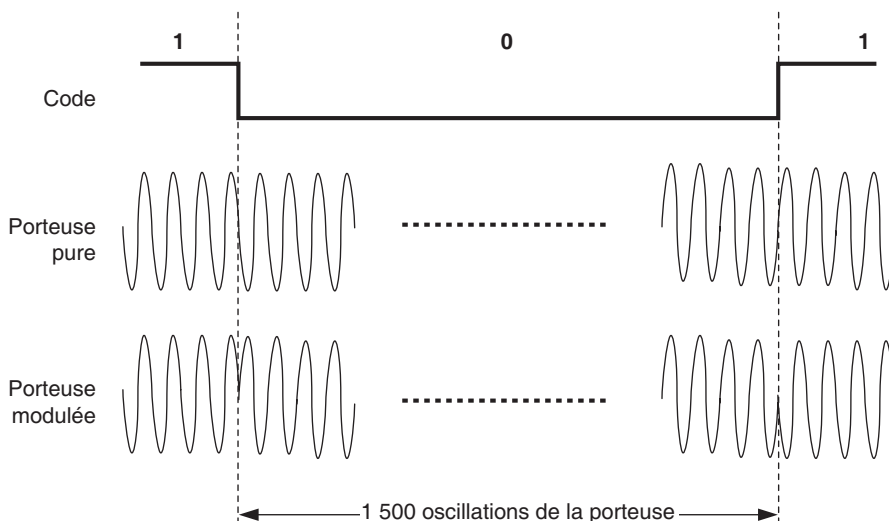


Figure 1.11

Modulation de la porteuse par le code GPS C/A

Les systèmes GPS et Galileo associent un code différent pour chaque satellite. Le récepteur, qui connaît le code de chacun de ces satellites, peut séparer les signaux qu'il reçoit en reconnaissant leurs codes. Cela fait partie de la fonction de corrélation du récepteur, aussi appelé corrélateur.

Maintenant que nous avons résolu le problème de la réception de multiples signaux provenant de plusieurs satellites, nous pouvons revenir sur le principe de fonctionnement de la navigation par satellite. Chaque récepteur doit trouver dans le signal des repères lui permettant de mesurer le temps de propagation de ce signal entre le satellite et le récepteur et ainsi de calculer la distance qui le sépare du satellite. C'est la mesure de distance, ou *ranging*.

Mesure de distance (ranging)

Outre qu'il permet au récepteur de recevoir les signaux de plusieurs satellites en même temps, le code GPS ou Galileo peut être utilisé comme repère, afin de permettre au récepteur de mesurer le temps de propagation du signal.

Les satellites synchronisent très précisément le début d'une seconde (donnée par leur horloge) avec le début d'une séquence de code (transmise dans leur signal). Le récepteur, qui a la possibilité de repérer le début de cette séquence de code lorsqu'il reçoit le signal, peut dès lors mesurer l'instant d'arrivée de ce repère par rapport à son horloge locale.

Pour cela, il génère la même séquence de code que le satellite et cherche à synchroniser le signal qu'il reçoit avec le signal qu'il génère lui-même. Lorsque les deux signaux sont synchronisés, ou corrélés, le récepteur détecte le signal reçu et connaît l'instant où le début de la séquence lui est parvenu. C'est ce qu'on appelle l'opération de corrélation du code.

La figure 1.12 illustre le processus de corrélation, faisant apparaître un pic de corrélation lorsque le code généré par le récepteur se synchronise avec le code reçu en provenance du satellite.

La précision de cette mesure dépend de celle avec laquelle le récepteur peut mesurer l'instant de réception du début de la séquence de code. Cette précision dépend en premier lieu de la puissance du signal reçu et des interférences causées par d'autres signaux sur ces mêmes fréquences. En conditions normales, la précision de la mesure correspond à une erreur de distance inférieure à 1 m.

Nous en avons maintenant presque fini avec l'étude du signal GPS et Galileo. Nous avons vu comment le récepteur pouvait réaliser une mesure de distance à l'aide du

code GPS ou Galileo. Il nous reste à voir comment le récepteur peut obtenir les données, par exemple, la position du satellite, à travers le signal reçu.

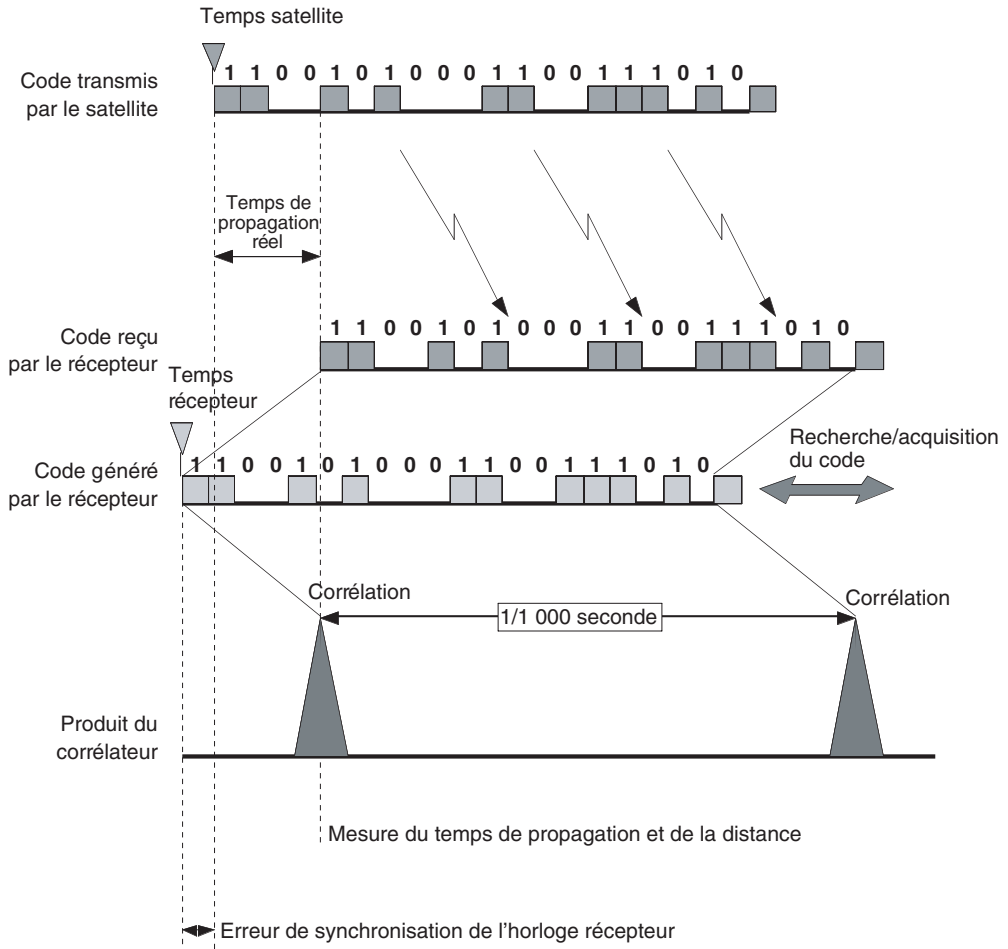


Figure 1.12
Corrélation du code pour GPS C/A

Les messages GPS et Galileo

Les messages GPS et Galileo contiennent des données bien définies, qui sont nécessaires aux récepteurs pour effectuer leur calcul de position. Ces données sont calculées dans les centres de contrôle au sol de GPS et de Galileo puis sont transmises au moins quotidiennement aux satellites lorsque ceux-ci sont en communication avec une station sol de transmission. Chaque satellite enregistre ces données à bord et les intègre dans les signaux qu'il transmet aux récepteurs.

Ces données comportent notamment les éléments suivants :

- **Almanachs.** Donnent les positions de tous les satellites de la constellation, sur plusieurs semaines, avec une précision de l'ordre de 1 km. Chaque satellite diffuse les almanachs concernant tous les satellites. Dès la réception du message d'un seul satellite, un récepteur peut obtenir les informations de position et d'état de l'ensemble de la constellation. La précision de ces almanachs est suffisante pour qu'un récepteur (connaissant approximativement sa position) sache quels satellites sont en vue et accélère ainsi sa recherche des signaux provenant des autres satellites et l'établissement de sa première position précise.
- **Éphémérides.** Donnent des informations sur la position des satellites, avec une précision de l'ordre de 1 à 10 m. Chaque satellite diffuse uniquement les éphémérides qui le concernent.
- **Corrections d'horloge.** Donnent l'écart (avance ou retard) de l'horloge du satellite par rapport au temps système GPS ou Galileo. On a vu que ces données permettaient également au récepteur de synchroniser son horloge par rapport au temps GPS ou Galileo, au travers du calcul de positionnement.
- **Paramètres de correction ionosphérique.** Nous verrons dans les sections suivantes que les hautes couches de l'atmosphère terrestre, qui constituent l'ionosphère, perturbent la propagation des signaux GPS et Galileo. Ces perturbations dégradent la précision de la mesure de distance. Afin de corriger partiellement cette dégradation, des paramètres de correction ionosphérique sont transmis par les satellites eux-mêmes et appliqués par les récepteurs lors de leur calcul de position.

Toutes ces données sont transmises selon un format et une séquence bien définis et standardisés. La définition de cette séquence et des fréquences de répétition de chaque message a été optimisée lors de la conception des systèmes afin de minimiser le temps de démarrage des récepteurs et d'assurer la continuité de la fourniture d'une position en cas de perte de messages (par exemple, lorsque le récepteur se trouve temporairement masqué).

La diffusion de ces informations est réalisée à un débit extrêmement faible, de l'ordre de 50 bit/s pour GPS C/A et jusqu'à 125 bit/s pour Galileo. Le débit de 50 bit/s est

équivalent à la transmission de 7 caractères ASCII, autrement dit de 7 pressions de touches d'un clavier d'ordinateur, par seconde. Ce débit est 1 000 fois plus faible que celui d'une ligne téléphonique numérique classique.

Il faut environ douze minutes pour recevoir l'ensemble des données GPS (éphémérides, corrections d'horloge, almanachs et corrections ionosphériques), et cinq minutes pour celles transmises par les satellites Galileo.

Ces messages sont numérisés, c'est-à-dire qu'ils se présentent sous la forme d'une séquence binaire de 0 et de 1, avec 50 valeurs par seconde, soit une valeur 0 ou 1 toutes les 20 ms, pour les messages GPS C/A.

Afin d'être incluses dans le signal des satellites, ces séquences binaires des messages sont superposées aux séquences binaires des codes GPS ou Galileo. Cette superposition consiste à inverser les 0 et les 1 du code quand le bit du message vaut 1 et à ne pas les modifier quand le bit du message vaut 0.

La figure 1.13 donne un exemple de superposition d'une séquence de données avec une séquence de code.

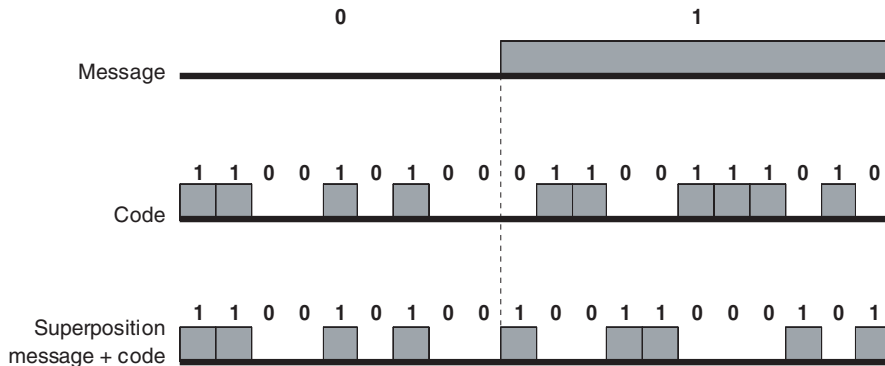


Figure 1.13

Superposition du message et du code pour GPS C/A

Dans le cas du signal GPS C/A, le code se présente sous la forme de séquences binaires de 0 et 1, avec 1 million de valeurs par seconde. Une séquence de code « à accès libre » dure environ 1 ms. On cherche donc à transmettre un bit de message de navigation en même temps que 20 séquences complètes de code, soit en même temps que 20 000 bits de code.

Le récepteur peut aisément déterminer toutes les 20 séquences de code quel bit de message a été superposé.

La figure 1.14 illustre comment sont intégrés les messages, le code et la porteuse dans les signaux C/A diffusés par les satellites GPS.

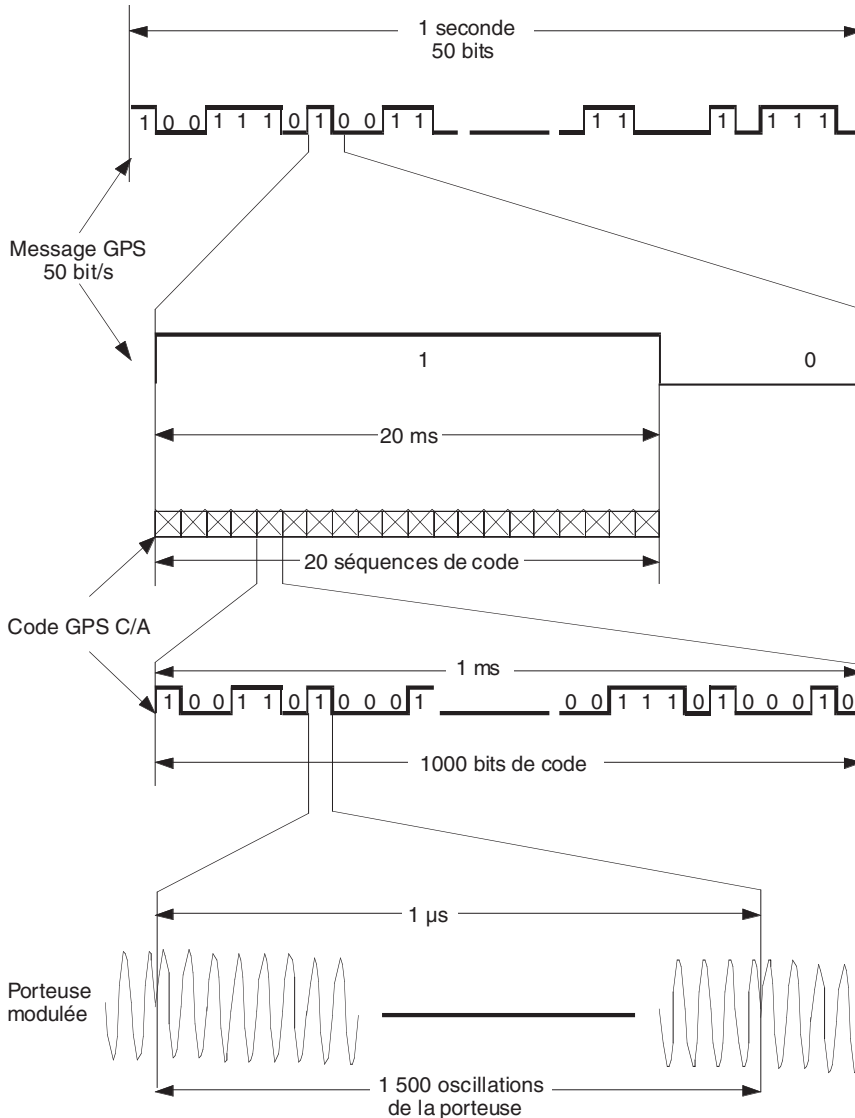


Figure 1.14

Relations entre la porteuse, le code et le message pour GPS C/A