



# Cours de Géométrie

## 13. Les systèmes de positionnement par satellites

[Prof. C. Debouche](#)

Les références bibliographiques citées dans ce texte sont consultables en suivant le lien <https://hdl.handle.net/2268/293535>

## Sommaire

Sommaire .....	2
13.1. Introduction et généralités .....	3
13.1.1. Les systèmes de positionnement par satellite .....	3
13.1.2. Le principe du positionnement par satellite.....	5
13.1.3. Les composantes du système de positionnement par satellite.....	6
13.2. La gestion du système .....	7
13.2.1. Le segment de contrôle.....	7
13.2.2. Le système de référence spatial .....	8
13.2.3. Le système de référence temporel .....	10
13.3. Les satellites .....	12
13.3.1. La constellation.....	12
13.3.2. Orbite des satellites.....	13
13.3.3. Signal émis par le satellite .....	15
13.3.4. L'influence de la position des satellites sur la précision du positionnement.....	19
13.4. L'utilisateur : équipement et mode opératoire .....	22
13.4.1. Composants .....	22
13.4.2. Modes opératoires.....	26
13.4.3. Acquisition des corrections pour le positionnement relatif.....	28
13.5. Techniques de mesure .....	31
13.5.1. Mesure sur le code.....	31
13.5.2. Mesure sur l'onde porteuse (mesure des phases).....	33
13.6. Techniques de calcul .....	37
13.6.1. Différence simple (SD).....	38
13.6.2. Différence double (DD).....	38
13.6.3. Triple différence (TD) .....	38
13.6.4. Par ajustement sur des mesures redondantes.....	39
13.7. Remarques et conclusions .....	40
Index.....	41

# 13. Les systèmes de positionnement par satellites

## 13.1. Introduction et généralités

### 13.1.1. Les systèmes de positionnement par satellite

La conquête de l'espace par l'Homme a débuté le 4 octobre 1957 par le lancement du premier satellite artificiel par l'Union Soviétique (URSS).

Depuis cette date de très nombreuses applications de la technologie spatiale ont vu le jour dans divers domaines (télécommunications, météo, photographies, environnement, etc.).

Plus particulièrement pour la géodésie et la topographie, les satellites artificiels constituent un repère permettant de se situer dans l'espace et dans le temps. Ils remplacent donc les étoiles, qui ont joué ce rôle depuis l'antiquité. D'une manière générale, le positionnement d'un objet quelconque situé sur terre, sur mer ou dans l'espace, peut se faire grâce à un système composé de satellites en orbite autour de la Terre. Un tel système a reçu le nom général de « **Système mondial de positionnement par satellites** » - **GNSS (Global Navigation Satellite System)**. Il existe à l'heure actuelle divers GNSS qui sont brièvement décrits ci-dessous (Transit, GPS, GLONASS, Galileo, etc.). Même si le système GPS est évidemment le plus développé actuellement et le plus connu, il est préférable d'utiliser l'acronyme GNSS pour faire référence au positionnement par satellite plutôt que l'acronyme GPS qui fait référence à un seul système. On parlera de récepteur GNSS et non de récepteur GPS pour faire allusion à l'équipement nécessaire à un positionnement par satellite (§ 13.4.1).

Dès 1958, la marine américaine lance un système de navigation par satellite (Navy Navigation Satellite System – NNSS, également appelé Transit), utilisable par les civils à partir de 1967. Basé sur 6 satellites, ce système était conçu et adapté à la navigation maritime.

En 1973, le Département de la Défense des États-Unis d'Amérique (DoD) conçoit un système de navigation par satellite appelé NAVSTAR, the **Global Positioning System**, actuellement connu sous l'acronyme **GPS**. Les premiers satellites sont lancés en 1978 et ce système est complètement déployé depuis 1994, avec 24 satellites en fonctionnement.

Simultanément au développement du GPS par les USA, l'URSS a développé son GNSS sous le nom de **GLONASS (GLOBAL Navigation Satellite System)**. Initialement réservé aux militaires, ce système a été ouvert aux usages civils en 1980. A la dissolution de l'URSS, c'est la Fédération de Russie qui a repris ce système. Il a compté jusqu'à 27 satellites en fonctionnement en 1996. Ce nombre est descendu à sept satellites opérationnels à la suite de la dissolution de l'URSS. A l'heure actuelle (décembre 2005) 18 satellites sont en activité et 24 satellites devraient être opérationnels en 2010-2011 (Gibbons 2006). Certains récepteurs disponibles peuvent recevoir les messages GPS et GLONASS.

En mars 2002 l'Union Européenne a décidé de lancer son propre GNSS sous le nom de **Galileo**. Le premier satellite a été lancé le 28 décembre 2005. Comprenant 30 satellites, déployés sur des orbites plus lointaines que celles du GPS, ce système sera vraisemblablement opérationnel en 2010. Il est plus amplement décrit dans le chapitre 14.

### 13. Le système GPS

Signalons enfin que la Chine a lancé deux satellites géostationnaires en 2000 qui sont les premiers éléments de leur "Beidou Experimental Satellite Navigation System".

### 13.1.2. Le principe du positionnement par satellite

La position d'un objet O dans l'espace peut être calculée à partir de la connaissance des distances qui séparent cet objet de trois points de coordonnées connues A, B et C, comme présenté à la figure 13.1.1. Chacune de ces trois distances donne lieu à une équation, constituant ainsi le système d'équations suivant :

$$d_{OA} = \sqrt{(x_A - x_O)^2 + (y_A - y_O)^2 + (z_A - z_O)^2}$$

$$d_{OB} = \sqrt{(x_B - x_O)^2 + (y_B - y_O)^2 + (z_B - z_O)^2}$$

$$d_{OC} = \sqrt{(x_C - x_O)^2 + (y_C - y_O)^2 + (z_C - z_O)^2}$$

où :  $d_{OA}$ ,  $d_{OB}$  et  $d_{OC}$  sont les distances séparant le point O respectivement des points A, B et C;

$x_A, y_A, z_A, x_B, y_B, z_B, x_C, y_C$  et  $z_C$ , sont les coordonnées connues des points A, B et C;  
 $x_O, y_O$  et  $z_O$  sont les coordonnées à calculer du point O.

Le positionnement par satellite est basé sur cette triangulation simple, les points A, B et C sont des satellites dont la position est connue, le point O est occupé par un récepteur qui capte les messages envoyés par les satellites et qui trouve dans ceux-ci ce qui lui est nécessaire pour calculer sa position, selon une technique de mesure des distances qui le sépare des satellites, exposée dans le paragraphe 13.5.

Selon ce principe, on comprend la nécessité de capter les messages émis par au moins trois satellites. En fait, la technique de mesure utilisée impose la réception d'un quatrième satellite afin de corriger le défaut de synchronisme des horloges du récepteur et des satellites. Le positionnement sera d'autant meilleur que le nombre de satellites dont le récepteur capte les messages est élevé.

De plus, il convient que les satellites soient bien dispersés autour du récepteur et non concentrés au zénith de celui-ci. On comprend donc que la qualité du positionnement peut varier d'un instant à l'autre et d'un endroit à l'autre en fonction du nombre et de la position des satellites "visibles" pour le récepteur.

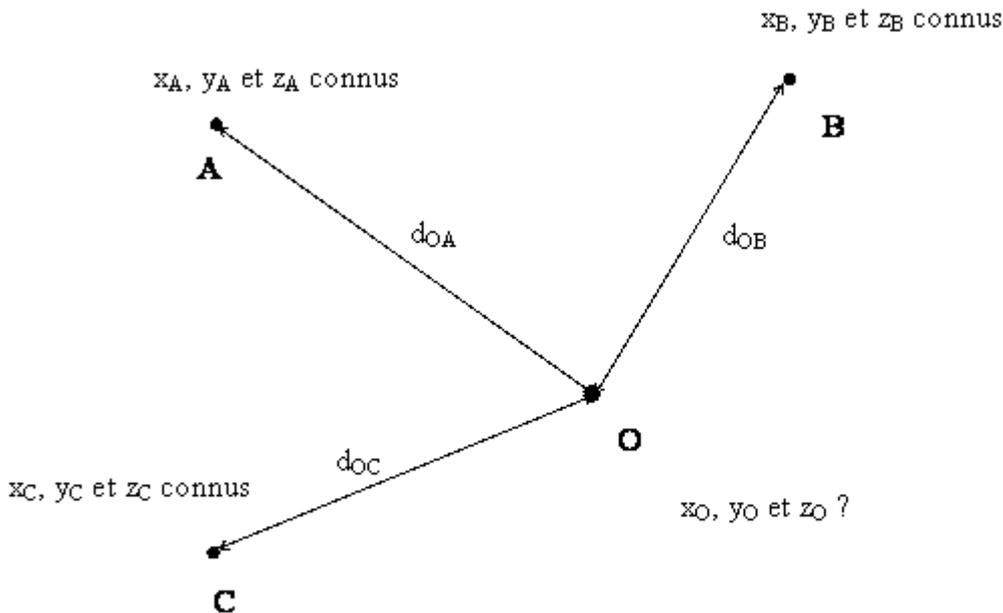


Figure 13.1.1. Calcul de la position d'un point par triangulation sur trois points connus.

### 13.1.3. Les composantes du système de positionnement par satellite

Un système de positionnement par satellite comprend trois segments. Le premier, appelé **segment de contrôle**, rassemble tous les équipements et services situés au sol et qui ont pour mission d'assurer la conduite du système c'est-à-dire le suivi et le guidage des satellites ainsi que la gestion des flux d'informations échangées entre le segment de contrôle, les satellites et les utilisateurs. Ce segment de contrôle est détaillé au paragraphe 13.2.

Le deuxième segment, dit **segment spatial** (space segment), comprend l'ensemble des satellites en orbite autour de la Terre. Il est détaillé au paragraphe 13.3.

Finalement le paragraphe 13.4 présente les équipements que les utilisateurs doivent utiliser pour effectuer un positionnement à partir des messages reçus des satellites. Ces équipements peuvent être très différents suivant la précision recherchée dans le positionnement. Le récepteur GNSS le moins coûteux (environ 200 €) permet un positionnement dont la précision exprimée en terme d'écart-type est d'environ 5 à 10 mètres. D'autres récepteurs peuvent donner une meilleure précision, pouvant aller jusqu'à des écarts-types inférieurs au centimètre. Leur coût est évidemment sensiblement plus élevé et se situe aux environs de 10.000 €. Une telle précision requiert souvent le recours à deux récepteurs utilisés simultanément (§ 13.4), ce qui augmente encore le coût des équipements requis.

La nature et le prix du récepteur, ainsi que la précision du positionnement sont conditionnés par la technique de mesure utilisée.

## 13.2. La gestion du système

### 13.2.1. Le segment de contrôle

Le **segment de contrôle** comprend toutes les installations et services qui remplissent les fonctions suivantes :

- Contrôle et maintenance des satellites ;
- Contrôle et ajustement de l'orbite des satellites ;
- Maintenance des horloges des satellites et du temps GPS ;
- Prédiction des positions des satellites (éphémérides) ;
- Mise à jour des messages émis par les satellites ;
- Commande des manœuvres nécessaires au maintien des satellites sur leur orbite.

Ce segment, aussi appelé système de contrôle opérationnel (Operational Control System - OCS) comprend :

- Une station de contrôle (Master Control Monitor Station) située dans une base aérienne (Schriever Air Force Base, précédemment appelée Falcon) de l'armée des États-Unis à proximité de la ville de Colorado Springs dans l'État du Colorado ;
- Cinq stations de "poursuite" (Monitor Station) situées à Hawaï, à Colorado Springs (USA), à Ascension Island, à Diego Garcia et à Kwajalein;
- Trois stations de "recharge" situées à Ascension Island, à Diego Garcia et à Kwajalein.



**Global Positioning System (GPS) Master Control and Monitor Station Network**

Figure 13.2.1. Implantation du segment de contrôle du système GPS (<https://www.gps.gov/systems/gps/control/>).

Les stations de poursuite captent les messages émis par les satellites, mesurent ainsi les distances qui les séparent de ces satellites et communiquent ces distances à la station de contrôle ainsi que diverses données météo.

La station de contrôle analyse et traite les informations transmises par les stations de poursuite, calcule les éphémérides les plus probables ainsi que les erreurs d'horloge des satellites et transmet aux stations de recharge les informations qu'elles devront envoyer aux satellites (éphémérides, erreur d'horloge et corrections de trajectoire).

### 13.2.2. Le système de référence spatial

Pour déterminer le déplacement des satellites autour de la Terre, conformément aux lois de Newton liant les forces, accélérations, vitesses et positions, il faut disposer d'un référentiel céleste, stationnaire dans l'espace ou animé d'une vitesse constante. C'est le **Système de Référence Conventionnel Céleste (Conventional Celestial Reference System - CCRS)**, décrit au paragraphe 2.4.2<sup>1</sup> et rappelé dans la figure 13.2.2 qui remplit cette fonction. Rappelons que l'axe des Z est confondu avec l'axe de rotation de la Terre, tel que positionné par rapport aux étoiles le 1<sup>er</sup> janvier 2000 à 12 heures. L'axe des X est déterminé par l'intersection de l'équateur dans sa position du 1<sup>er</sup> janvier 2000 avec le plan contenant l'orbite décrite par le centre de la Terre dans sa rotation autour du soleil, dit aussi plan de l'écliptique.

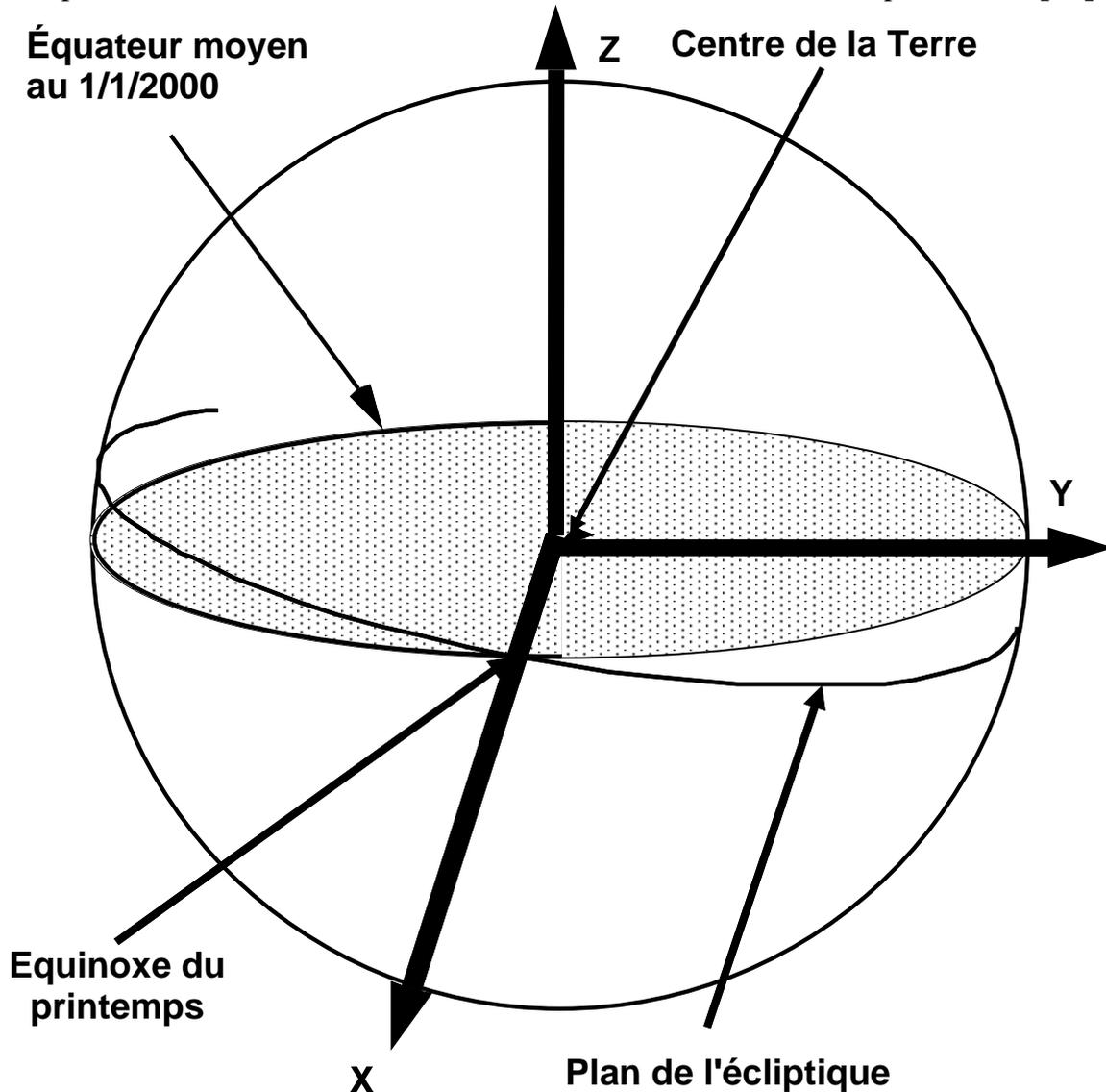


Figure 13.2.2. Système de référence pour le positionnement des satellites. (The Conventional Celestial Reference System (CCRS)).

<sup>1</sup> <https://hdl.handle.net/2268/293594>

## 13. Le système GPS

Par contre, pour ce qui concerne le positionnement des objets sur la Terre, il faut évidemment définir un système de référence qui soit fixé sur la terre et non défini à partir de repères célestes. Pour ce faire, c'est le **Système de Référence Conventionnel Terrestre (Conventional Terrestrial Reference System - CTRS)**, décrit également au paragraphe 2.4.2<sup>1</sup> et rappelé dans la figure 13.2.3. Dans ce système l'axe des Z est également confondu avec l'axe de rotation de la Terre. Ce dernier n'est malheureusement pas stable dans sa position vis-à-vis de la Terre. Son intersection avec la croûte terrestre se déplace de quelques mètres sur un an. Il a donc fallu prendre également une convention quant à l'orientation de cet axe des Z. C'est la moyenne des positions occupées par le pôle nord au cours des années 1900 à 1905 qui est prise comme **pôle conventionnel (Conventional Terrestrial Pole – CTP)** pour définir l'orientation de l'axe des Z du CTRS. Quant à l'axe des X, il est déterminé par l'intersection de l'équateur avec un méridien de référence passant par l'observatoire de Greenwich, situé dans la banlieue de Londres. L'axe des Y est évidemment perpendiculaire au plan contenant les axes X et Z.

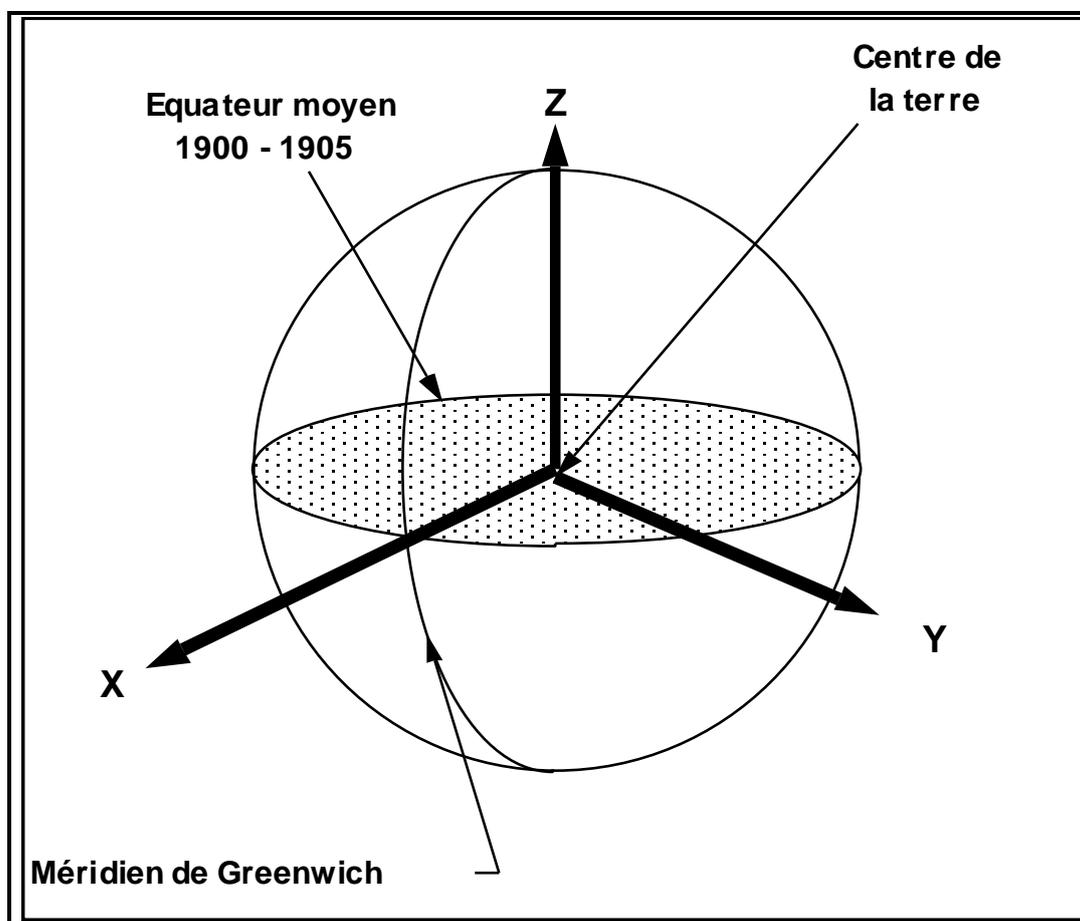


Figure 13.2.3. Système de référence pour le positionnement des points terrestres. (Conventional Terrestrial Reference System - CTRS)

Il faut évidemment pouvoir passer du CCRS au CTRS pour calculer les distances séparant les satellites du récepteur de l'utilisateur. Pour ce faire doivent être connues :

- La position de l'axe de rotation de la Terre par rapport aux étoiles. Celle-ci varie constamment d'environ 1" par an selon une évolution connue et prévisible ;
- La position de l'axe de rotation de la Terre par rapport à celle-ci. La position instantanée du pôle sur la surface terrestre peut être estimée avec une précision de un à deux centimètres à partir de signaux émis par divers satellites ;

## 13. Le système GPS

L'angle que font les axes X du CCRS et du CTRS, c'est-à-dire l'angle entre l'équinoxe du printemps (intersection de l'équateur et de l'écliptique) et le méridien de Greenwich.

Les **coordonnées rectangulaires géocentrées** X, Y et Z fournies par l'usage du CTRS ne sont évidemment pas utilisables dans la pratique. Elles doivent être transformées en coordonnées géodésiques (longitude, latitude et hauteur) grâce à un système de référence géodésique (**datum**) tel que présenté dans le paragraphe 2.4<sup>2</sup>. En particulier, le système GPS utilise le système de référence géodésique WGS84, tel que défini dans le paragraphe 2.4.2 4<sup>2°</sup>. Rappelons qu'il est fondé sur l'ellipsoïde mondial GRS80, aussi appelé ellipsoïde WGS84.

Tout point localisé dans ce système WGS84 aura ainsi les **coordonnées rectangulaires géocentrées**  $X_{WGS84}$ ,  $Y_{WGS84}$  et  $Z_{WGS84}$ . Il aura aussi les **coordonnées géodésiques**  $\lambda_{WGS84}$ ,  $\phi_{WGS84}$  et  $h_{WGS84}$  qui se rapportent à l'ellipsoïde de référence GRS80.

Les coordonnées géodésiques peuvent à leur tour subir une projection, telle qu'exposée dans le chapitre 3, pour s'exprimer en coordonnées cartographiques (également appelées coordonnées rectangulaires !). C'est la projection UTM (§ 3.3.4<sup>3</sup>) qui est habituellement utilisée dans le système GPS.

Le chapitre 4 explicite les transformations que doivent subir ces coordonnées pour être exprimées dans un autre datum. Ces transformations sont le plus souvent inévitables car les utilisateurs doivent se positionner dans leur datum local comme de BD72 utilisé en Belgique (§ 2.4.3.1<sup>2°</sup>).

### 13.2.3. Le système de référence temporel

Les satellites du système GPS effectuent deux révolutions complètes par **jour sidéral**. Un jour sidéral est la durée d'une rotation complète de la Terre sur son axe par rapport aux étoiles fixes, plus lointaines que le soleil. En raison de la fluctuation du jour sidéral, on a défini le jour sidéral moyen. Celui-ci est plus court qu'un jour solaire et vaut 23 h 56 min 4,0954 s.

Le **jour solaire** est la durée d'une rotation complète de la Terre sur son axe par rapport au soleil. Cette durée étant très variable, on a également défini le jour solaire moyen. Ce dernier a servi de base à la définition de la seconde jusqu'en 1960, c'est-à-dire la seconde solaire moyenne.

Un jour solaire moyen vaut 1,002737 jour sidéral moyen. Le temps solaire moyen à Greenwich a évidemment été identifié par l'acronyme GMT (Greenwich Mean Time).

Un jour solaire moyen comprend 24 heures et donc 86.400 secondes solaires moyennes.

En 1960 une nouvelle définition de la seconde a été adoptée comme étant égale à  $1/31556925,9747$  de la révolution de la Terre autour du soleil en l'année 1900.

Rappelons que depuis 1967 la seconde est la durée de 9.192.631.770 périodes de la radiation correspondant à la transition entre les deux niveaux hyperfins de l'état fondamental de l'atome de césium 133. Il s'agit de la définition donnée dans le système international d'unité (SI). Il s'agit de la seconde SI (SI second) ou **seconde atomique**. Cette valeur correspond exactement à la définition précédente en application entre 1960 et 1967. Le temps mesuré par la seconde atomique est le **Temps Atomique International (TAI ou IAT)**. Un jour du SI (SI

---

<sup>2</sup> <https://hdl.handle.net/2268/293594>

<sup>3</sup> <https://hdl.handle.net/2268/293634>

### 13. Le système GPS

day) comprend 86.400 secondes atomiques et un siècle du calendrier julien comprend 36.525 jours SI.

Ce Temps Atomique International est une échelle de temps précise et uniforme. Cependant elle n'est pas liée à la rotation de la Terre autour de son axe des pôles ni à sa révolution annuelle autour du soleil. Il en résulte un décalage qui, cumulé sur quatre mille ans, pourrait atteindre 12 heures [Allan et al. (1997), cité par Misra et Enge (2001)]. Pour éviter cet inconvénient, une échelle de temps conventionnelle a été établie sur la base du TAI, corrigé sporadiquement par l'ajout d'une seconde à l'issue du dernier jour d'un mois. Il s'agit du **Temps Universel Coordonné** (Coordinated Universal Time – **UTC**). En conséquence, UTC et TAI diffèrent entre eux d'un nombre entier de secondes, variable dans le temps. L'UTC est généré par le Bureau International des Poids et Mesures (BIPM) situé à Paris. Les ajouts ou suppression de secondes de correction sont déterminés par l'International Earth Rotation Service (**IERS**) situé à l'Observatoire de Paris.

Le **temps GPS (GPST)** est une échelle de temps continue (sans ajout de seconde de correction comme l'UTC) correspondant au TAI moins 19 secondes. Cet écart constant résulte de l'égalité parfaite entre le GPST et l'UTC en date du 6 janvier 1980 à 0 heure.

Dans le GPST un instant particulier est identifié par un nombre de semaines et un nombre de secondes dans la semaine.

Afin de faciliter les calculs, notamment de la durée séparant deux dates, on utilise les **jours juliens** (JJ en français et JD en anglais). Il s'agit d'une numérotation continue et décimale des jours solaires moyens, dont l'origine est située le 1<sup>er</sup> janvier à 12 heures de l'an 4713 avant Jésus-Christ. Ainsi le 1<sup>er</sup> janvier 2000 à 12 heures, est le JD 2.451.545,0.

Pour simplifier les opérations de calcul et de transcription, on utilise aussi le **jour julien modifié (MJD)** en anglais) obtenu en soustrayant 2.400.000,5 au jour julien, avec en conséquence la relation suivante:

$$\text{MJD} = \text{JD} - 2.400.000,5.$$

Cela revient à prendre comme origine le 17 novembre 1858 à 0 h du temps universel.

A ne pas confondre les jours juliens avec le **calendrier julien** introduit en 44 av. J-C par Jules César et d'application jusqu'à son remplacement par le calendrier Grégorien en 1582 par le Pape Grégoire XIII.

Dans le GPST un instant particulier est identifié par un nombre de semaines et un nombre de secondes dans la semaine. A noter cependant que le nombre de semaines est remis à zéro dès qu'il atteint 1024. Il a eu pour origine le dimanche 6 janvier 1980 à 0 heure (JD 2.444.244,5) et a été remis à zéro le dimanche 22 août 1999 à 0 heure.

Le numéro de la semaine GPS peut se calculer en fonction du jour julien par l'expression suivante:

$$\text{Sem} = \text{INT}[(\text{JD} - 2.444.244,5)/7],$$

où Sem est le numéro de la semaine dans le GPST,  
INT est la fonction "nombre entier",  
JD est le jour julien du jour de la semaine qui doit être calculé.

Des informations plus détaillées sur les systèmes de référence spatial et temporel peuvent être trouvées dans les ouvrages généraux de MISRA et ENGE (2001) et de HOFMANN et al.

## 13. Le système GPS

(1997). Plus particulièrement pour le système de référence temporel, on pourra consulter l'ouvrage de BIÉMONT (2000).

### 13.3. Les satellites

#### 13.3.1. La constellation

La constellation de base du système GPS comprend 24 satellites qui gravitent autour de la Terre en approximativement 11 heures et 58 minutes. Il y a souvent plus de 24 satellites opérationnels du fait que de nouveaux satellites sont lancés pour remplacer de plus vieux satellites. Chaque satellite répète approximativement une même trace sur la Terre au cours de ses différentes révolutions. Les satellites sont répartis sur six plans orbitaux séparés par  $60^\circ$  de longitude, inclinés d'environ  $55^\circ$  sur le plan de l'équateur. Les figures 13.3.1 et 13.3.2 illustrent la position de ces satellites dans leur mouvement d'ascension en latitude. Cette constellation permet, à partir d'un point quelconque situé sur la surface terrestre, de recevoir les messages émis par cinq à huit satellites.

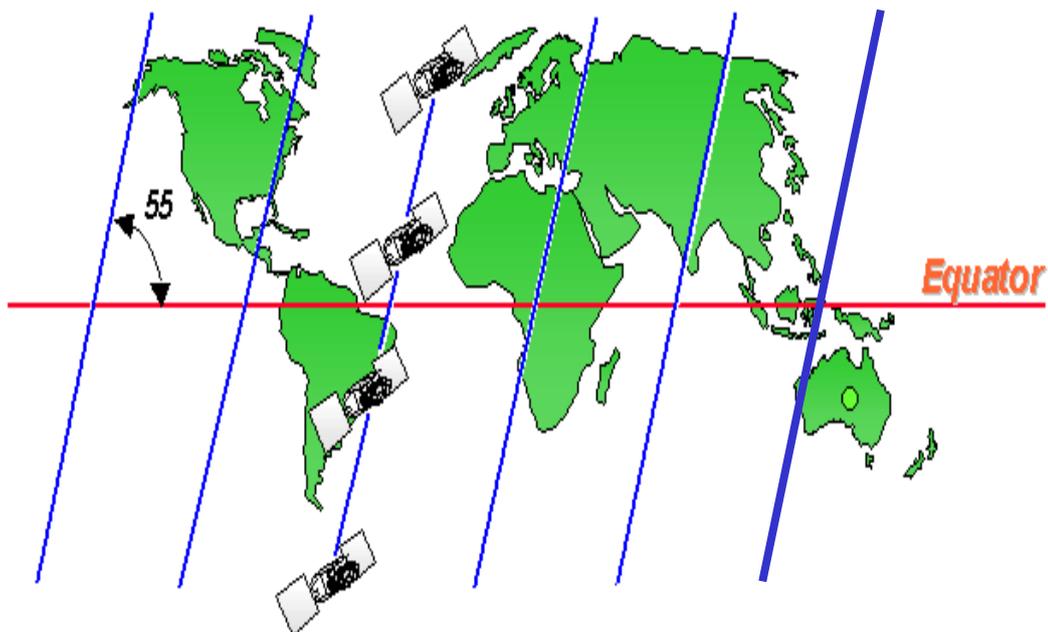


Figure 13.3.1. Développement des orbites des satellites du système GPS.

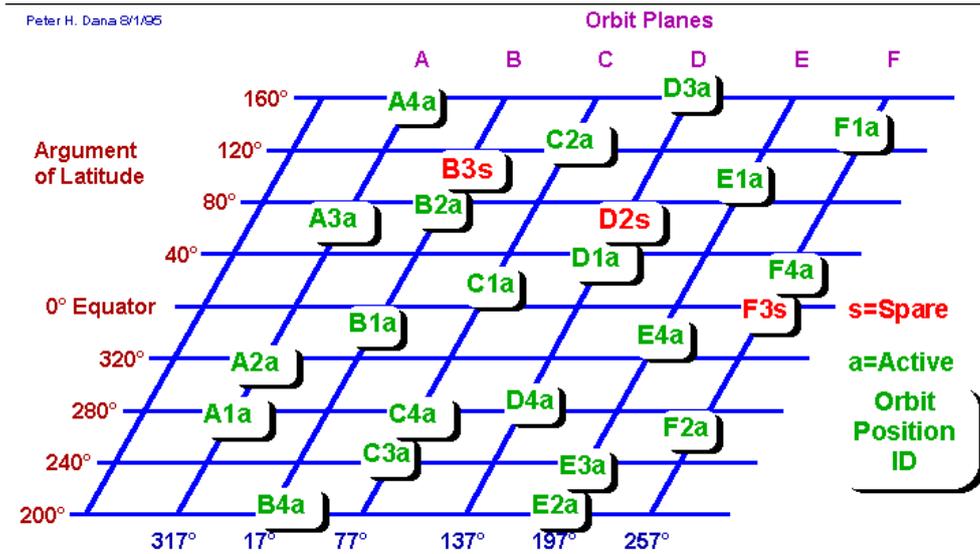


Figure 13.3.2. Position des satellites du système GPS dans leur mouvement d'ascension en latitude.

### 13.3.2. Orbite des satellites

Le positionnement par satellite implique la connaissance de la position des satellites. La précision de ce positionnement dépend évidemment de la précision avec laquelle la position des satellites est connue. Cette position est incluse dans le message diffusé par chaque satellite (message de navigation paragraphe 13.3.3). Elle peut également être obtenue auprès de diverses sources via le réseau internet.

Le mouvement des satellites GPS est déterminé par l'application des lois de Newton, en considérant, principalement, l'effet de l'attraction qu'exerce sur le satellite la masse de la Terre. Il en résulte que la trajectoire du satellite est une ellipse dont un des foyers est le centre de masse de la Terre. Il en est de même pour toutes les planètes du système solaire, dont le mouvement est régi par l'attraction de la masse du soleil. C'est l'astronome et physicien allemand Kepler (1571-1630) qui a établi cette propriété.

En conséquence, le satellite n'est pas toujours à la même distance de la Terre et sa vitesse varie constamment. Son déplacement est le plus rapide lorsqu'il est le plus proche de la Terre, c'est-à-dire au **périgée** de son orbite. Au contraire, évidemment, sa vitesse est la plus faible à l'**apogée** de son orbite, au moment où il est le plus éloigné de la Terre.

La position instantanée du satellite est identifiée par la valeur de six paramètres, dits paramètres orbitaux de Kepler. La figure 13.3.3 présente le positionnement de ces satellites au moyen de ces six paramètres. Rappelons que ce positionnement se fait dans le Système de Référence Conventionnel Céleste (Conventional Celestial Reference System - **CCRS**), détaillé au paragraphe 13.2.2.

### 13. Le système GPS

Ces six paramètres sont les suivants :

- Le demi grand axe de l'ellipse orbitale du satellite qui vaut environ 26.560 km ;
- L'excentricité de l'ellipse orbitale du satellite qui vaut environ 0,003 ;
- L'angle  $\Omega$  situant l'intersection du plan orbital et du plan équatorial terrestre par rapport à l'axe des X (équinoxe du printemps) ;
- L'angle  $i$  déterminant l'inclinaison du plan orbital sur le plan équatorial terrestre ;
- L'angle  $\omega$  situant le périégée de l'orbite du satellite dans le plan orbital et par rapport au plan équatorial terrestre ;
- L'angle  $v$  situant le satellite dans son plan orbital par rapport à la position du périégée de l'ellipse.

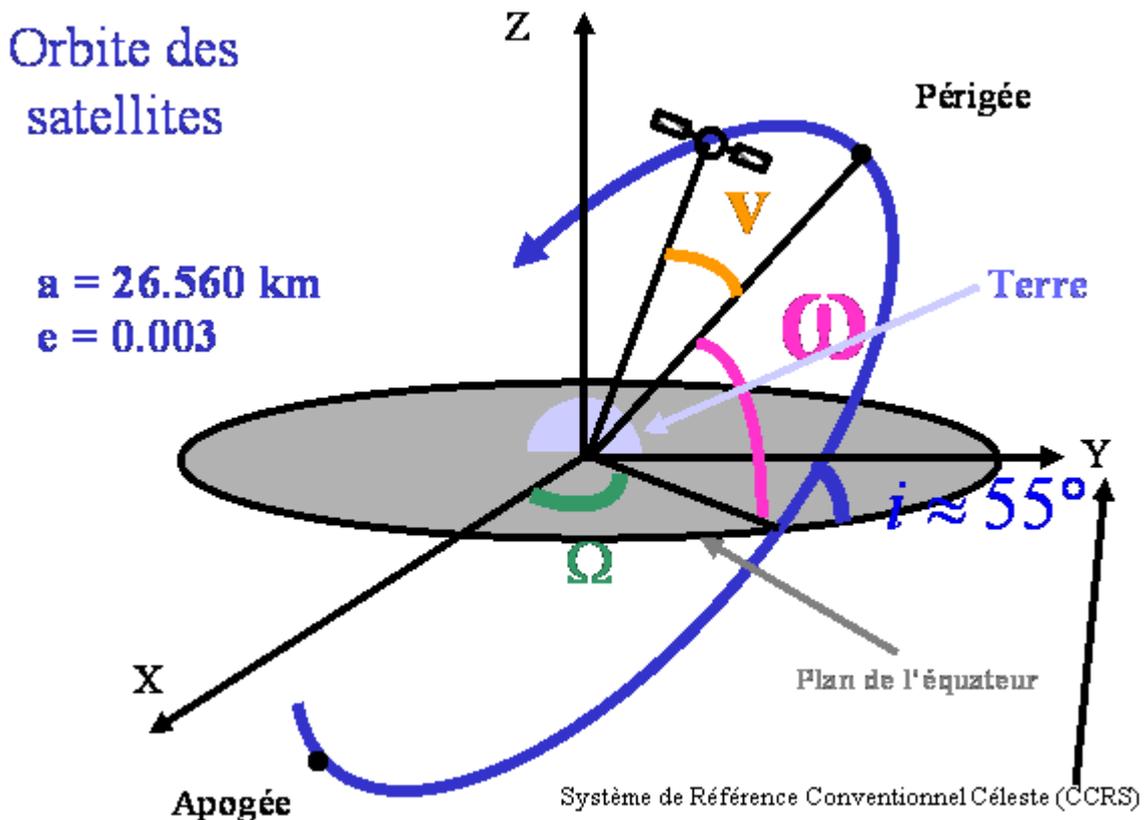


Figure 13.3.3. Paramètres orbitaux de Kepler situant le satellite.

Rappelons que l'excentricité de l'ellipse se définit par la relation (§ 2.3.3<sup>4</sup>) :

$$e = \sqrt{\frac{a^2 - b^2}{a^2}},$$

- où
- a est le demi grand axe de l'ellipse ;
  - b est le demi petit axe de l'ellipse (26.480 km dans notre cas) ;
  - e est l'excentricité de l'ellipse.

Remarquons que cette ellipse est très proche d'un cercle vu la grande proximité entre ses demis axes et donc la faible valeur de son excentricité. A remarquer également que la valeur de a est approximativement quatre fois la valeur du rayon moyen de la Terre (§ 2.3.3<sup>4</sup>).

<sup>4</sup> <https://hdl.handle.net/2268/293594>

## 13. Le système GPS

Les satellites sont situés à environ 20.200 km de la surface terrestre.

La trajectoire réelle des satellites s'écarte de cette orbite théorique en raison de l'irrégularité du champ de pesanteur terrestre (effet réduit vu la distance), des frottements atmosphériques, de la force d'attraction du soleil et de la lune et de la pression due aux vents solaires.

### 13.3.3. Signal émis par le satellite

1° Le système de positionnement par satellite fonctionne à partir d'informations émises en permanence par les satellites et décodées par les récepteurs des utilisateurs. Contrairement aux appareils de mesure électronique de distance, il n'y a pas de retour d'une information depuis les récepteurs vers les satellites, c'est un système à sens unique. Cela résulte évidemment du caractère militaire du système GPS qui requiert de ne pouvoir identifier la position d'un récepteur. Cela permet également le fonctionnement simultané d'un nombre non limité de récepteurs.

2° Les informations émises par les satellites sont complexes et supportées par des ondes électromagnétiques. Les grandeurs physiques qui caractérisent une onde électromagnétique sont rappelées dans le tableau 13.3.1 et sont définies à partir de la notion de cycle, illustrée dans la figure 13.3.4.

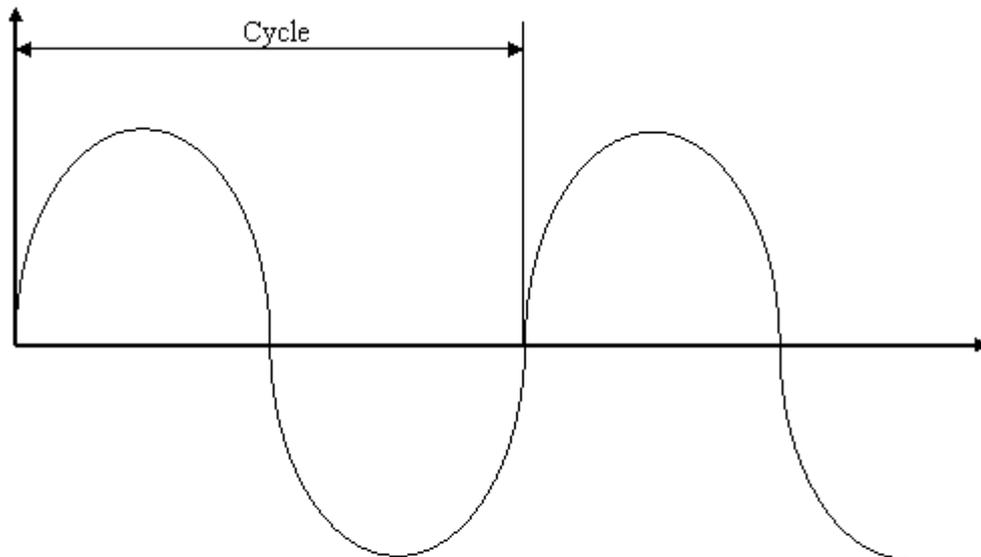


Figure 13.3.4. Développement d'une onde électromagnétique.

La **période** est le temps nécessaire au développement complet d'un cycle. La **fréquence** est le nombre de cycles développés par seconde. La **phase** décrit la situation de l'onde, c'est-à-dire la valeur de la force électromagnétique à un instant donné. Elle peut s'exprimer en nombre fractionnaire de cycle ou en unité d'angle (radian généralement) ou en longueur totale développée. La longueur d'onde est la distance parcourue par l'onde pendant le développement d'un cycle.

## 13. Le système GPS

Tableau 13.3.1. Grandeurs caractérisant une onde électromagnétique

Grandeur	Symbole	Unité
Période	$P_o$	s cycle <sup>-1</sup>
Fréquence	$f$	Hertz (Hz) ou cycle s <sup>-1</sup>
Phase	$\psi$	m, radian ou cycle
Longueur d'onde	$\lambda_o$	m

Ces grandeurs sont liées entre elles par la relation suivante :

$$f = \frac{1}{P_o} = \frac{c}{\lambda_o},$$

où  $c$  est la vitesse de propagation de la lumière dans le vide qui vaut 299.792.458 m s<sup>-1</sup>.

La valeur instantanée de la fréquence est aussi la dérivée de la phase par rapport au temps et, en conséquence, la phase peut s'obtenir par intégration de la fréquence sur le temps :

$$f = \frac{d\psi}{dt} \quad \text{et} \quad \psi = \int_{t_0}^t f dt.$$

3° Chaque satellite est équipé d'un oscillateur de grande précision et stabilité, générant une onde de base de fréquence égale à 10,23 MHz.

A partir de cette onde de base, plusieurs ondes porteuses sont élaborées de manière à être situées dans la bande L (entre 1 et 2 GHz) qui appartient aux ultra hautes fréquences. Parmi celles-ci les ondes L<sub>1</sub> et L<sub>2</sub> sont utilisables par les civils. Elles sont respectivement caractérisées par les fréquences de 1.575,42 (154 x 10,23) et 1.227,60 (120 x 10,23) MHz. La disponibilité de deux ondes, utilisables par des récepteurs bi fréquences, améliore la précision du positionnement en permettant l'élimination de certaines erreurs dues aux perturbations subies par ces ondes lors de leur propagation du satellite au récepteur.

Deux autres ondes sont également émises par les satellites GPS mais ne sont pas utilisables par les civils (L<sub>3</sub> dédiée au système de détection des détonations nucléaires et L<sub>4</sub> dédiée à d'autres usages militaires).

Une nouvelle onde L<sub>5</sub>, de fréquence de 1.176,45 MHz sera émise par une nouvelle génération de satellites GPS, dont le premier a été lancé en 2006. Elle est utilisable par les récepteurs civils adaptés. Elle est caractérisée par une plus grande puissance ce qui améliore les conditions de sa réception.

4° Sur chacune de ces ondes porteuses, sont superposés par modulation un "code" ainsi que des informations digitalisées.

Les codes sont constitués d'une répétition sans fin d'une séquence particulière de valeurs binaires (0 et 1). Ces séquences ont l'apparence d'une série aléatoire. C'est la raison pour laquelle ces codes sont parfois dénommés "code PRN" (Pseudo Random Noise). Ces séquences sont spécifiques à chaque satellite de manière à éviter les interférences éventuelles entre les messages émis par les autres satellites. Il y a plusieurs codes différents.

## 13. Le système GPS

Le premier code, le plus répandu, est destiné au positionnement standard, peu précis. C'est le code dénommé **C/A** (Coarse/acquisition). Il est composé de 1.023 bits, appelés "chips". Il est émis à une fréquence de 1,023 Mcps (méga chips par seconde). Il se répète donc chaque milliseconde et la durée d'un chips est d'une microseconde, pour une longueur d'environ 300 mètres. La longueur correspondant aux 1.023 bits qui constituent la séquence entière est donc d'environ 300 km.

Le deuxième code, dénommé code de précision ou **code P** ou P(Y), est constitué d'une séquence beaucoup plus longue (environ  $10^{14}$  bits), émise à une fréquence plus élevée (10,23 Mcps), ce qui produit un chips sur une longueur d'environ 30 mètres. La séquence entière se répète approximativement tous les 266,4 jours. Cette séquence est partagée en 37 segments d'environ une semaine qui sont alloués aux différents satellites de manière à ce que les codes qu'ils émettent ne puissent être confondus.

Un troisième code, dénommé Y, est limité aux usages militaires.

A noter que le code P n'est pas directement utilisable par les récepteurs civils. Il est, en effet, protégé par un dispositif secret anti-leurre (**Anti-Spoofing AS**), destiné à empêcher la génération de faux codes dans le but d'induire le récepteur en erreur sur sa position. L'analyse simultanée des deux ondes  $L_1$  et  $L_2$ , sur lesquelles est superposé le même code P permet son identification et donc son utilisation. Il faut donc disposer d'un récepteur bifréquences pour pouvoir utiliser ce code P.

5° En plus du code, des informations digitalisées sont également superposées sur l'onde porteuse dans un **message de navigation**. Ces informations concernent :

- L'état de fonctionnement du satellite ;
- L'horloge du satellite (écart entre le temps qu'elle indique et le temps GPS);
- La position du satellite ;
- L'instant d'émission du message ;
- La situation de l'ionosphère ;
- L'almanach et l'état de fonctionnement de l'ensemble des satellites.

Ce message de navigation est constitué de 1.500 bits, émis à la fréquence de 50 bits par seconde. Il se renouvelle donc toutes les 30 secondes. L'écart d'horloge et la position du satellite sont renouvelés dans chaque message de navigation et sont donc mis à jour toutes les 30 secondes. Par contre les autres informations (et notamment l'almanach de l'ensemble des satellites) sont complètement distribuées dans une succession de 25 messages de navigation. Il faut donc 12,5 minutes pour mettre à jour cet almanach dans le récepteur.

La modulation du code et du message de navigation sur l'onde porteuse a pour conséquence de répartir l'énergie du signal émis sur une large bande de fréquence au lieu de la concentrer sur la seule fréquence de l'onde porteuse. Cela réduit très fortement les possibilités de brouillage de ce signal.

La figure 13.3.5 détaille la composition des deux signaux construits à partir des ondes  $L_1$  et  $L_2$ .

Pratiquement, chaque satellite émet trois signaux différents :

- $L_1$ , le code C/A et le message de navigation ;
- $L_1$ , le code P et le message de navigation ;
- $L_2$ , le code P et le message de navigation.

Lors du décodage des signaux des satellites par le récepteur, celui-ci va calculer et afficher le **rapport signal/bruit (SNR)**. Ce rapport doit être le plus élevé possible. Il peut être utilisé pour sélectionner les satellites pris en considération par le récepteur pour calculer sa position.

### 13. Le système GPS

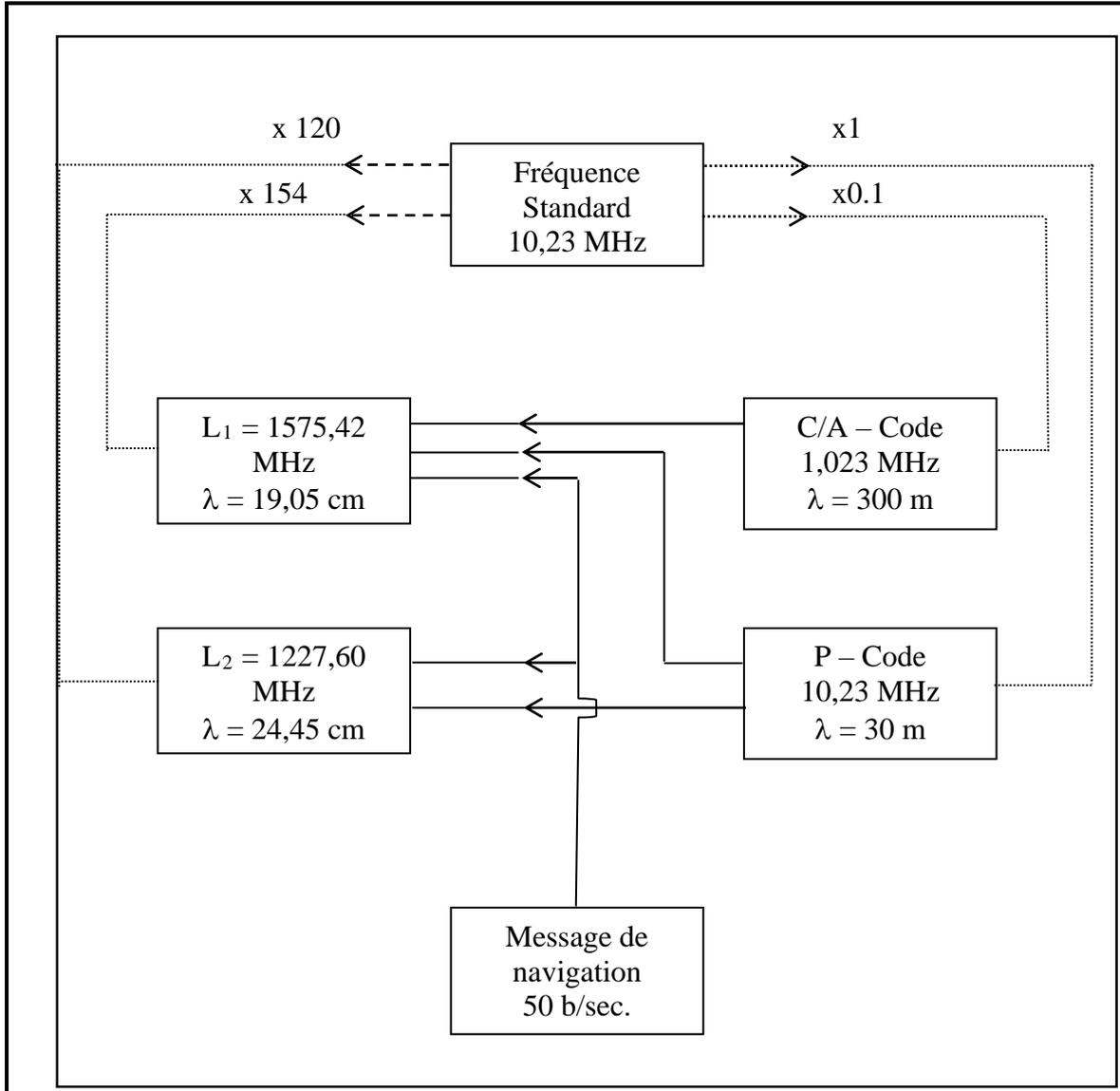


Figure 13.3.5. Organisation des signaux émis par les satellites (DEMONIE 1987).

### 13.3.4. L'influence de la position des satellites sur la précision du positionnement

Comme rappelé dans le paragraphe 13.1.2, la position du récepteur est calculée en fonction de la distance qui le sépare d'un minimum de quatre satellites. La précision du positionnement dépend donc de la précision avec laquelle ces distances peuvent être estimées. Les techniques utilisées pour calculer ces distances sont exposées dans le paragraphe 13.5.

Pendant un autre élément va intervenir dans le calcul de la position du récepteur. C'est la position des satellites par rapport au récepteur. La figure 13.3.6 illustre cette influence par un exemple à deux dimensions. Un opérateur se positionne sur un point O dans un plan, à partir de la mesure des distances qui le sépare de deux points de coordonnées connues A et B. Chacune de ces deux distances est mesurée avec une précision déterminée, dont il résulte une région de tolérance qui lui est associée et qui est hachurée en gris. La région de tolérance de la position de l'opérateur est obtenue par l'intersection des régions de tolérance des deux distances. Elle est hachurée en noir. La situation 1 produit une région de tolérance plus réduite que la situation 2. Le positionnement 1 est donc plus précis que le positionnement 2, alors que les distances sont mesurées avec la même précision.

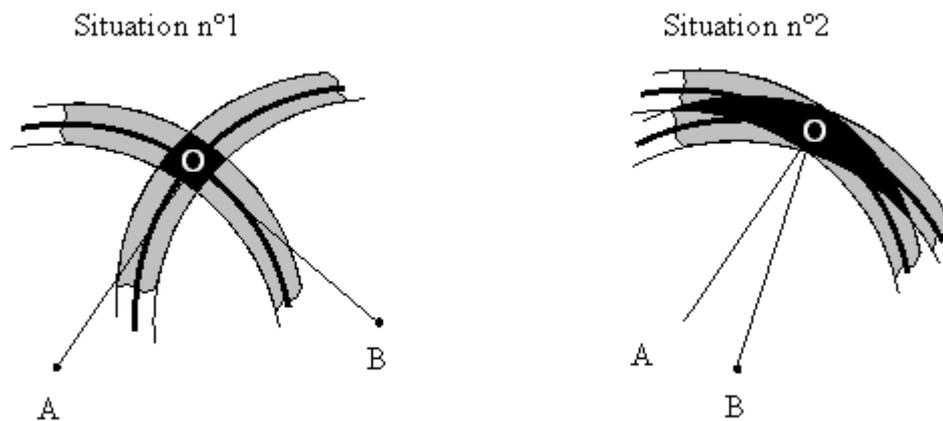


Figure 13.3.6. Influence de la position des deux références A et B sur la précision du positionnement du point O.

Il en est de même dans le positionnement par satellites. Si tous les satellites sont concentrés dans un cône réduit dont le sommet est le récepteur, le positionnement sera de faible précision. Si, au contraire, les satellites sont bien dispersés dans l'espace, le positionnement sera plus précis. La figure 13.3.7 illustre cette notion. La position idéale de quatre satellites est obtenue lorsqu'un d'entre eux est situé au zénith du récepteur, les trois autres satellites étant situés sur l'horizon du récepteur, séparés entre eux d'un angle de  $120^\circ$ .

### 13. Le système GPS

Pour tenir compte de l'influence de la disposition des satellites, la précision du positionnement s'obtiendra par la relation :

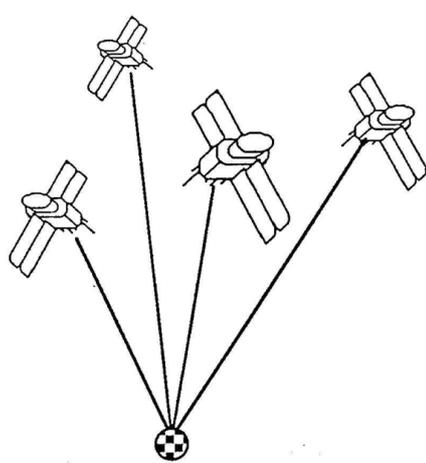
$$\sigma = \text{DOP } \sigma_0$$

- où  $\sigma_0$  est la précision des mesures des distances entre les satellites et le récepteur (éphéméride incertaine, erreurs de propagation, erreur d'horloge et de temps, bruits...),  
 $\sigma$  est la précision du positionnement,  
DOP mesure l'effet de la position relative des satellites.

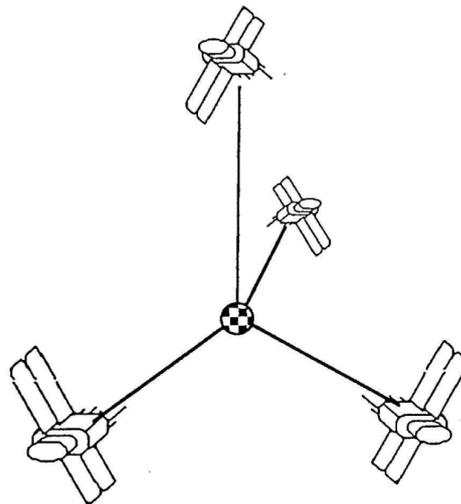
La valeur de la DOP (dilution of precision) est d'autant plus faible que la disposition des satellites est favorable à un résultat précis. Les récepteurs GPS offrent souvent la possibilité de filtrer les positionnements en excluant ceux qui dépassent une valeur plafond de la DOP. La valeur de six est souvent retenue comme plafond des valeurs admissibles de la DOP.

La notion de DOP se décline en diverses composantes suivant les grandeurs qui font l'objet du positionnement:

<b>G D O P</b>	position et temps	(3D + t)
<b>P D O P</b>	position	(3D)
<b>H D O P</b>	coordonnées horizontales	(2D)
<b>V D O P</b>	Altitude	(1D)
<b>T D O P</b>	Temps	(t)



Valeur élevée de la DOP



Valeur faible de la DOP

Figure 13.3.7. Illustration de l'effet de la position des satellites sur la DOP (Wells 1987:4.22).

La figure 13.3.8 présente l'évolution de la DOP, telle que prévue en date du 1<sup>er</sup> août 2006 pour la journée du 17 août 2006, pour un récepteur qui est situé en un point identifié par une

### 13. Le système GPS

latitude nord de 50°33' et une longitude est de 4°44'. On peut y constater que cette journée comprend plusieurs périodes caractérisées par des valeurs élevées de la DOP. C'est une restriction importante dans l'utilisation des récepteurs GPS. Si une telle situation n'est pas fréquente, il arrive cependant souvent de devoir attendre quelques minutes avant de pouvoir procéder à un positionnement en raison d'une mauvaise valeur de la DOP.

La prévision de l'évolution de la DOP est une fonction commune des logiciels qui accompagnent la plupart des récepteurs GPS disponibles sur le marché. Ces logiciels permettent généralement, outre l'indication indispensable du lieu de mesure, de préciser un angle d'élévation minimum ainsi que la présence éventuelle d'un masque particulier (un bâtiment par exemple) en fonction de la station de mesure.

La mise à jour des informations disponibles pour le logiciel se fait par la connexion régulière du récepteur ou de son contrôleur (§ 13.3.4) à l'ordinateur sur lequel est installé le logiciel. En effet, lors de la réception des signaux émis par les satellites, le récepteur actualise les données nécessaires à la prévision du mouvement des satellites. Ces données sont contenues dans l'almanach.

La préparation d'une mission de mesure par l'usage du système GPS se fait donc en vérifiant les bonnes conditions de réception prévues pour la période de mesure, c'est-à-dire le nombre de satellites qui seront « visibles » pour le récepteur ainsi que leur disposition dans le ciel. Ces indications sont synthétisées dans la DOP prévue.

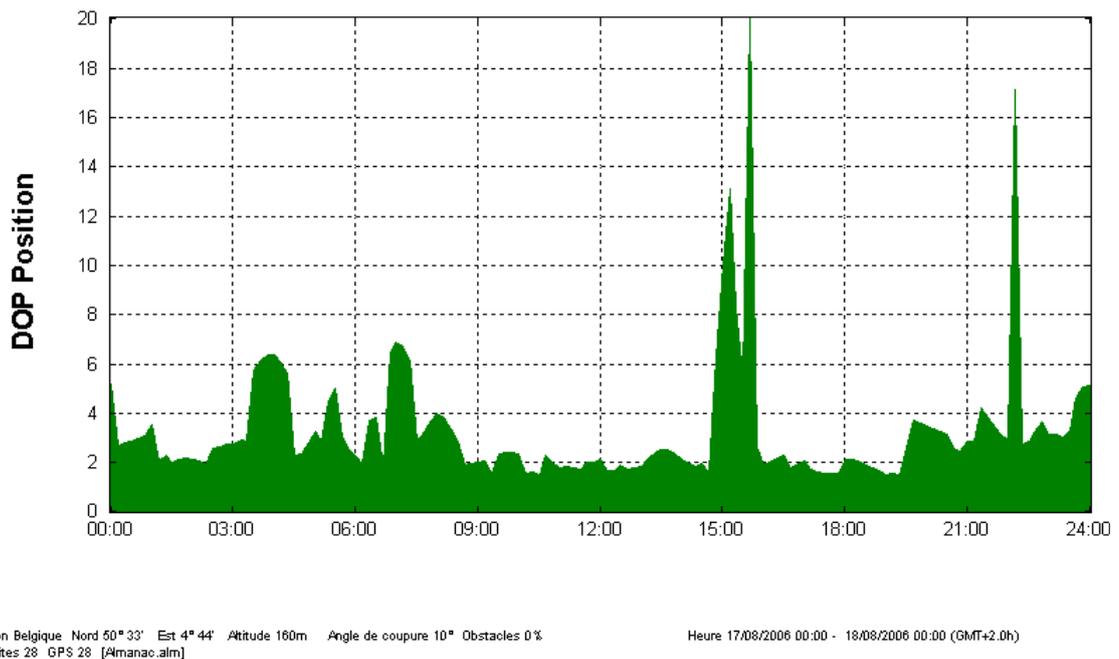


Figure 13.3.8. Évolution de la DOP, à Gembloux, le 17/08/2006 entre 0 et 24 heures.

## 13.4. L'utilisateur : équipement et mode opératoire

### 13.4.1. Composants

1° Il existe une grande diversité de récepteurs capables de procéder à un positionnement par satellite (récepteurs GNSS). Les prix de ceux-ci varient entre 250 euros et plus de 25.000 euros. Tous ces récepteurs sont capables de fournir une position dans l'espace. Ce qui les différencie est évidemment la qualité de cette position et essentiellement sa précision. Elle résulte de la capacité du récepteur à traiter soit uniquement le code C/A (§ 13.3.3), soit ce même code et la phase de l'onde porteuse  $L_1$ , soit également l'onde porteuse  $L_2$  (récepteur bifréquence) et le code P.

2° Relativement à la précision fournie, on peut classer les récepteurs en trois catégories. La première comprend les récepteurs les moins coûteux et les moins précis. Il est proposé de les appeler « **récepteurs de navigation** », leur fonction étant principalement de faciliter le déplacement. Leur précision actuelle est de quelques mètres et ils fonctionnent en positionnement absolu (§ 13.4.2). La catégorie intermédiaire regroupe des récepteurs monofréquence qui offrent une précision de quelques décimètres en procédant à des positionnements relatifs (§ 13.4.2). Il est proposé de les appeler « **récepteurs d'inventaire** ». Ils conviennent particulièrement bien à une grande diversité d'applications qui ne nécessitent pas une grande précision, comme par exemple des opérations d'inventaire et de localisation d'éléments divers (populations végétales, types de sol, mobilier urbain, etc.). Finalement la troisième catégorie comprend évidemment les récepteurs les plus coûteux et les plus précis. Ce seront les « **récepteurs topographiques** » qui peuvent fournir une précision de quelques centimètres, voire moins encore. Ils utilisent les deux fréquences  $L_1$  et  $L_2$ , (§ 13.3.3), déterminent les distances en mesurant le déphasage des ondes porteuses et fonctionnent en positionnement relatif, le plus souvent en temps réel et en mode RTK (§ 13.4.2).

Les récepteurs se distinguent également par le nombre de canaux dont ils disposent, c'est-à-dire le nombre de satellites dont les signaux peuvent être reçus et traités simultanément.

Les récepteurs se distinguent également par leur capacité à recevoir des informations complémentaires aux signaux émis par les satellites et qui améliorent la précision du positionnement (positionnement différentiel DGPS ou plus exactement DGNSS, paragraphe 13.4.2), soit en temps réel par onde radio, gsm ou émission de satellites géostationnaires, soit en temps différé (post traitement).

Plus récemment, les récepteurs se caractérisent également par leur capacité à recevoir les signaux des satellites du système GLONASS en plus des satellites GPS, ce qui justifie de les appeler récepteurs GNSS et non récepteur GPS.

3° Les fonctions minimales d'un récepteur sont les suivantes :

- Capturer les signaux émis par les satellites « visibles » (GPS et GLONASS);
- Séparer les signaux de ces différents satellites ;
- Décoder le message de navigation ;
- Calculer la distance séparant le récepteur des différents satellites « visibles » ;
- Calculer la position du récepteur et, éventuellement, sa vitesse ;
- Afficher les résultats.

## 13. Le système GPS

D'autres fonctions peuvent s'ajouter aux précédentes :

- Capturer des signaux complémentaires (corrections GNSS, voir § 13.4.2) aux signaux émis par radio, téléphone ou satellites géostationnaires ;
- Traiter ces signaux complémentaires en vue du calcul d'une position plus précise ;
- Stocker les signaux des satellites en vue d'un traitement différé de ceux-ci ;
- Stocker les résultats de mesure ;
- Afficher des informations complémentaires sous forme de carte ;
- Capacité de transférer les informations stockées dans un ordinateur personnel ;
- Etc.

4° Les composants d'un récepteur sont :

- L'antenne ;
- Le décodeur (analyse des fréquences) ;
- L'unité de calcul ;
- L'unité de contrôle et d'affichage (clavier et écran) ;
- La source d'énergie (batterie ou pile) ;
- Le système d'enregistrement (éventuel).

Ces composants peuvent être rassemblés dans un seul appareil de taille relativement réduite (format de poche) pour les récepteurs les plus simples et les moins coûteux, dit également récepteurs de navigation (figure 13.4.1). Pour les récepteurs plus élaborés, ces composants sont souvent rassemblés en trois parties différentes : l'antenne à fixer sur une canne ou sur un bipied ou un trépied (figure 13.4.2), l'unité de contrôle, d'affichage et d'enregistrement tenue en main ou fixée sur la canne de l'antenne (figure 13.4.3) et un boîtier (figure 13.4.4), situé dans un sac à dos et contenant le décodeur, l'unité de calcul et la source d'énergie. S'y ajoute éventuellement un gsm de communication permettant de recevoir les corrections du système différentiel. Ces éléments sont reliés entre eux par des câbles.

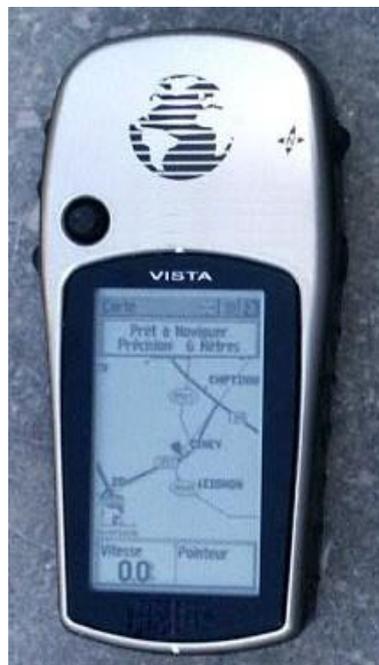


Figure 13.4.1. Récepteur GPS de navigation.

### 13. Le système GPS



Figure 13.4.2. Antenne de réception des signaux émis par les satellites.



Figure 13.4.3. Unité de contrôle, d'affichage et d'enregistrement d'un récepteur de la marque Trimble.

### 13. Le système GPS



Figure 13.4.4. Boîtier d'un récepteur GNSS de la marque Trimble contenant l'unité de décodage, l'unité de calcul et les batteries.

L'évolution de ces équipements va vers leur miniaturisation ainsi que vers le remplacement de la liaison entre les différents éléments par câble par une liaison sans fil, sensiblement plus pratique.

5° Les récepteurs peuvent recevoir et fournir des données de diverses natures. Pour ce faire, il existe des formats normalisés d'échange de données. Nous retiendrons principalement les formats **RTCM SC-104**, **RINEX** et **NMEA 0183** détaillés respectivement dans les annexes 10.1 à 10.3<sup>5</sup>.

Le format RTCM, développé par les Radio Technical Commission for Maritime Services, est utilisé pour transmettre en temps réel les corrections GNSS émises par une station de référence afin de procéder à un positionnement relatif plus précis que le positionnement absolu (§ 13.4.2).

Le format RINEX, développé par l'Institut d'Astronomie de l'Université de Berne, est utilisé pour transmettre ces mêmes corrections mais en vue d'un traitement différé qui permet le calcul d'un positionnement relatif, au bureau, après que la session de mesure sur le terrain soit terminée.

Le format NMEA 0183, développé par la National Marine Electronics Association, est utilisé par les récepteurs GNSS pour transmettre le résultat d'un positionnement (position, vitesse et autres données) à un autre récepteur ou à un ordinateur.

---

<sup>5</sup> <https://hdl.handle.net/2268/293542>

### 13.4.2. Modes opératoires

1° Une première distinction dans les modes opératoires doit être faite, en fonction du matériel et de l'environnement disponibles, entre le positionnement **absolu** et le positionnement **relatif**.

Le positionnement absolu est le plus simple. Il se pratique avec un seul récepteur situé sur le point à positionner. Il reçoit les signaux émis par les satellites de la constellation GPS, et éventuellement GLONASS, sans autres informations. Ce type de positionnement est le moins juste et le moins précis parce qu'il ne bénéficie d'aucune correction.

Le positionnement relatif se pratique avec un récepteur dit "**mobile**" et un récepteur dit "fixe". Le récepteur mobile est situé sur le point à positionner. Le récepteur fixe est situé sur un point de coordonnées connues. Il est aussi appelé la **base** ou la station de référence. Le segment de droite situé entre la base et le mobile s'appelle la **ligne de base**. Les deux récepteurs captent les signaux des mêmes satellites aux mêmes moments. Les coordonnées du récepteur fixe étant connues, des corrections peuvent être calculées soit sur les distances entre le récepteur fixe et les satellites, soit sur les coordonnées calculées pour le récepteur fixe à partir des signaux satellitaires. Ces corrections sont envoyées au récepteur mobile qui les applique au calcul de ses coordonnées.

Le mot "relatif" est souvent réservé au dispositif calculant les coordonnées à partir de la mesure sur la phase de l'onde porteuse (§ 13.3.3), alors que le mot "différentiel" est plutôt réservé à la mesure effectuée sur le code, avec l'acronyme DGPS ou DGNSS de portée plus générale.

Ces **corrections GNSS** peuvent être envoyées au récepteur mobile en temps réel par onde radio ou par téléphonie gsm. Elles peuvent également être importées par l'utilisateur après sa session de mesure si son récepteur n'est pas équipé du dispositif de réception de ces corrections ou s'il n'existe pas de corrections émises en continu sur le territoire du lever. Il s'agira dans ce cas d'un traitement différé ou post-traitement, qui n'est possible que si le récepteur peut mémoriser les signaux reçus des satellites et si cette fonction du récepteur a été activée pendant la session de mesure.

Les corrections communiquées en temps réel le sont dans un format standardisé qui a été proposé par les Radio Technical Commission for Maritime Services et qui porte de ce fait le nom **RTCM SC-104**. Ce format est détaillé en annexe 10.1<sup>5</sup>.

Les corrections communiquées en temps différé le sont dans un format développé par l'Institut d'Astronomie de l'Université de Berne et dénommé **RINEX** (Receiver Independant EXchange Format), présenté en annexe 10.2.

Le positionnement relatif est beaucoup plus juste et plus précis que le positionnement absolu. Il permet, en effet, d'éliminer la plus grande partie des erreurs dues à la propagation des signaux satellitaires à travers l'ionosphère et la troposphère. Il nécessite cependant la disponibilité de corrections. Celles-ci peuvent être fournies par un dispositif extérieur à l'utilisateur (§ 13.4.3) s'il existe sur le territoire concerné par le lever. Dans le cas contraire, l'utilisateur doit acquérir deux récepteurs, l'un étant en position de base et l'autre (le mobile) se déplaçant sur les points à lever. L'acquisition d'un deuxième récepteur double pratiquement le prix de l'équipement, ce qui n'est pas anodin.

La précision du positionnement relatif diminue lorsque qu'augmente la distance séparant le récepteur mobile de la base.

## 13. Le système GPS

2° Une autre distinction dans les modes opératoires doit être faite entre le **lever statique** et le **lever cinématique**. Dans le premier cas, un minimum de deux récepteurs travaillant simultanément restent en station le temps nécessaire à l'obtention d'un nombre suffisant de données à partir de quatre satellites ou plus. Ce scénario est répété de manière à occuper si possible deux fois chaque sommet. Chaque lever prend une durée variable en fonction de la longueur de la distance séparant les sommets, de la configuration des satellites et des conditions atmosphériques. L'expérience montre que la durée moyenne d'un lever est d'une heure.

La figure 13.4.5 montre un exemple de lever statique mené avec trois récepteurs. Le tableau 13.4.1 présente l'horaire suivi pour ce lever en comptant 30 minutes de déplacement entre les différents points.

Le lever statique convient bien aux longues distances ainsi que lorsque le nombre de satellites accessibles est limité à quatre. Il convient également lorsque de nombreux obstacles comme des arbres ou des constructions limitent les possibilités de recours au lever cinématique ou en "stop and go".

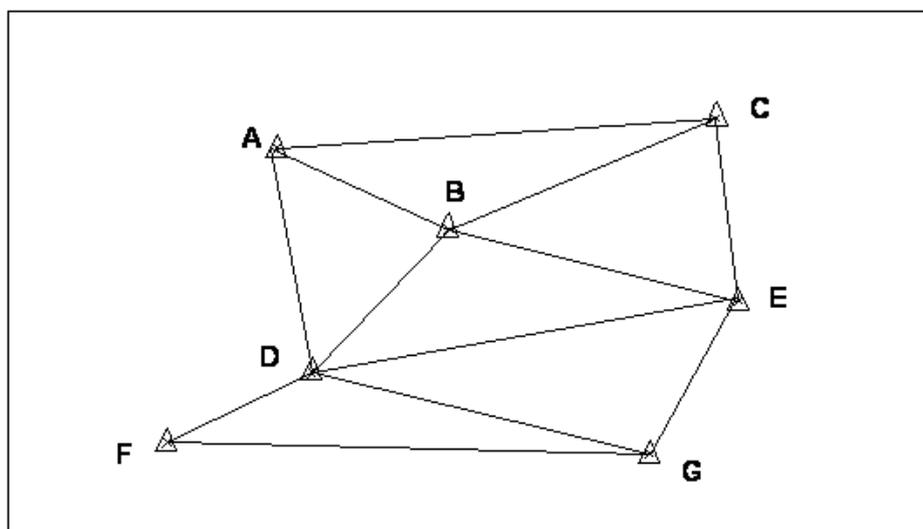


Figure 13.4.5. Implantation d'un lever statique (ECKELS 1992).

Tableau 13.4.1. Organisation d'un lever statique (ECKELS 1992).

Temps	Récepteur 1	Récepteur 2	Récepteur 3
12 h 00 à 13 h 00	A	B	C
13 h 30 à 14 h 30	A	D	B
15 h 00 à 16 h 00	C	B	E
16 h 30 à 17 h 30	D	E	G
18 h 00 à 19 h 00	D	F	G

Les redondances permettent évidemment de procéder à des compensations des erreurs accidentelles.

On peut réduire la durée d'occupation des points à condition de revenir sur ces mêmes points après un temps suffisant pour que la disposition des satellites soit significativement différente. Il s'agit d'un **lever pseudocinématique relatif**.

## 13. Le système GPS

Le lever statique peut aussi se faire avec un seul récepteur mis en fonctionnement sur un point pendant une durée suffisante que pour obtenir des coordonnées d'une qualité acceptable.

Dans le positionnement cinématique, le récepteur est en mouvement et c'est sa trajectoire qui est l'objet du lever. C'est le cas d'un véhicule ou d'un randonneur par exemple. Dans ce cas on peut souvent paramétrer le récepteur en imposant un intervalle de temps ou une distance parcourue fixe entre chaque lever de position.

A noter que le mode opératoire le plus utilisé actuellement comprend un récepteur de référence statique pendant toute la session de mesure et un récepteur mobile, successivement installé sur tous les points à lever pendant la session de mesure, mais sans interruption de la réception des signaux satellitaires. La communication des corrections entre le récepteur de référence et le récepteur mobile se faisant en temps réel et le récepteur mobile étant déplacé de point en point, ce mode opératoire porte le nom de cinématique en temps réel (RTK – Real Time Kinematic).

On parle également de mode semi-cinématique ou de "Stop and go" lorsque le récepteur se déplace sur une trajectoire à lever (une limite de parcelle par exemple) en s'immobilisant fréquemment le long de cette trajectoire pour déterminer les coordonnées de ces points d'arrêt.

3° En plus de pouvoir lever des points, les récepteurs GNSS permettent souvent de lever des lignes et des surfaces. Le lever d'une ligne se fait en parcourant cette ligne de manière continue. Le récepteur mémorise une succession de points à intervalles de temps ou de distance constants et choisis. La surface est une ligne fermée.

### 13.4.3. Acquisition des corrections pour le positionnement relatif

1° Les « **corrections GNSS** » sont utilisées dans le cas de positionnement relatif, tant sur le code (DGPS ou DGNSS) que sur la phase.

Elles peuvent être importées par l'utilisateur d'un récepteur après la mission de mesure sur le terrain. Il s'agit alors d'un traitement différé ou post-traitement. Cette importation se fait via le réseau Internet et il existe de nombreux serveurs de corrections en vue d'un traitement différé. Ces corrections sont contenues dans des fichiers au format RINEX (annexe 10.2<sup>6</sup>).

Elles peuvent aussi être importées en temps réel, soit par téléphone gsm, soit par onde radio captée par une antenne spécifique ou incorporée dans l'antenne de réception des signaux satellitaires.

Ces corrections peuvent être servies à l'échelle d'un continent, d'un pays ou d'une partie de pays. Elles peuvent également être émises par l'utilisateur lui-même s'il dispose de sa station de référence, c'est-à-dire d'un deuxième récepteur. Rappelons que la précision du positionnement se dégrade lorsqu'augmente la distance séparant le récepteur mobile du récepteur fixe.

Ces corrections peuvent être émises à partir d'une seule station de référence ou d'un ensemble de stations de référence. Dans ce dernier cas, il est fréquent de calculer les corrections en fonction de la situation du récepteur mobile et en combinant les corrections calculées à partir de plusieurs stations de référence encadrant la situation du récepteur mobile. Cela revient à créer une **station de référence virtuelle (VRS)** à proximité immédiate du récepteur mobile.

---

<sup>6</sup> <https://hdl.handle.net/2268/293542>

### 13. Le système GPS

2° A l'échelle de continents, différents pays (USA, UE et Japon) ont placé des satellites géostationnaires qui émettent en permanence, sur la même fréquence  $L_1$  que celle des satellites GPS, des corrections précises relatives aux orbites des satellites GPS et GLONASS, aux horloges embarquées dans ces satellites, au climat de l'ionosphère et de la troposphère, corrections calculées par un réseau important de stations de contrôle au sol. Ces systèmes sont nommés **SBAS** (Satellite-based Augmentation Systems). Leur utilisation est gratuite. Notons que ces satellites émettent également des informations relatives au bon fonctionnement des satellites GPS et GLONASS (**KASSER M. 2001**).

Les principaux SBAS existants actuellement sont

- (1) **WAAS** (Wide Area Augmentation System) effectif pour les longitudes comprises entre  $40^\circ$  W et  $180^\circ$  W et fonctionnant à partir de trois satellites géostationnaires et de 25 stations couvrant les territoires des USA et du Canada, <http://gpsinformation.net/exe/waas.html>
- (2) **EGNOS** (European Geostationary Navigation Overlay) pour les longitudes comprises entre  $40^\circ$  W et  $60^\circ$  E et fonctionnant à partir de trois satellites géostationnaires et de 30 stations couvrant le territoire de l'Union Européenne. [http://www.esa.int/esaNA/GGG63950NDC\\_egnos\\_0.html](http://www.esa.int/esaNA/GGG63950NDC_egnos_0.html)
- (3) **MSAS** (MTSAT Satellite-based Augmentation System) pour les longitudes comprises entre  $120^\circ$  E et  $165^\circ$  E et fonctionnant à partir de deux satellites géostationnaires et de stations couvrant le territoire du Japon.

Même si ces corrections peuvent être captées en dehors du territoire couvert par les stations de référence, leur pertinence s'estompe évidemment lorsque le récepteur est situé à une distance croissante de ce territoire.

La plupart des récepteurs d'inventaire peuvent capter et décoder ces corrections, parfois sous la seule appellation de « WAAS ».

3° Dans le but d'améliorer la précision du positionnement des bateaux, environ 200 stations « beacon » sont installées dans le monde, généralement sur les côtes maritimes. Le tableau 13.4.2 énonce les pays qui possèdent une ou plusieurs stations beacon.

Tableau 13.4.2. Liste des pays possédant une ou plusieurs stations beacon

<a href="#"><u>Australia</u></a>	<a href="#"><u>France</u></a>	<a href="#"><u>Lithuania</u></a>	<a href="#"><u>Singapore</u></a>
<a href="#"><u>Belgium</u></a>	<a href="#"><u>Germany</u></a>	<a href="#"><u>Malaysia</u></a>	<a href="#"><u>South Africa</u></a>
<a href="#"><u>Bermuda</u></a>	<a href="#"><u>Hong Kong</u></a>	<a href="#"><u>Netherlands</u></a>	<a href="#"><u>Spain</u></a>
<a href="#"><u>Brazil</u></a>	<a href="#"><u>Iceland</u></a>	<a href="#"><u>New Zealand</u></a>	<a href="#"><u>Sweden</u></a>
<a href="#"><u>Canada</u></a>	<a href="#"><u>India</u></a>	<a href="#"><u>Norway</u></a>	<a href="#"><u>Taiwan</u></a>
<a href="#"><u>China</u></a>	<a href="#"><u>Ireland</u></a>	<a href="#"><u>Panama</u></a>	<a href="#"><u>United Arab Emirates</u></a>
<a href="#"><u>Denmark</u></a>	<a href="#"><u>Japan</u></a>	<a href="#"><u>Poland</u></a>	<a href="#"><u>United Kingdom</u></a>
<a href="#"><u>Egypt</u></a>	<a href="#"><u>Korea</u></a>	<a href="#"><u>Puerto Rico</u></a>	<a href="#"><u>USA</u></a>
<a href="#"><u>Estonia</u></a>	<a href="#"><u>Kuwait</u></a>	<a href="#"><u>Russia</u></a>	
<a href="#"><u>Finland</u></a>	<a href="#"><u>Latvia</u></a>	<a href="#"><u>Saudi Arabia</u></a>	

Une station « **beacon** » est équipée d'une radio beacon. Cette dernière est caractérisée par le fait qu'elle émet un signal en continu, sur une fréquence déterminée et dans toutes les

### 13. Le système GPS

directions. Les signaux de ces stations beacon peuvent être captés gratuitement par les récepteurs GNSS équipés à cette fin.

La situation des stations beacon peut être obtenue sur le site <http://www.trimble.com/findbeacon.asp>. Une station beacon est située à Ostende. Ses caractéristiques sont présentées au tableau 13.4.3. Les numéros des types de message renvoient au contenu du message dans le format RTCM (annexe 10.1<sup>6</sup>).

Tableau 13.4.3. Caractéristiques de la station beacon d'Ostende (source : Trimble).

Position:	51°14'N, 2°55'E
Reference Station ID:	640/641
TX Station ID:	420
Frequency (kHz):	312
Nominal Range:	220 km @ 50 µV/m
Message Types:	3 6 7 9 16
Bitrate (bit/s):	200
Station in operation:	Yes
Integrity monitoring:	Yes

4° Sur le territoire belge, il existe un producteur de corrections en temps réel par Région. Ces trois systèmes fournissent des corrections pour le positionnement relatif sur la phase (RTK) ainsi que des fichiers de corrections pour le traitement différé au format RINEX. Le tableau 13.4.4 présente ces trois systèmes. A noter que le système Walcors fournit également des corrections différentielles sur le code (DGNSS ou DGPS) diffusées via le service DGPSDATA du réseau DAB (digital audio broadcasting) de la RTBF (<http://gps.wallonie.be/dab.html>).

Tableau 13.4.4. Systèmes de corrections GNSS belges

Région	Nom	Site	Nombre de stations
Bruxelles	<b>GPSBru</b>	<a href="http://www.ngi.be/agn/FR/FR0.shtm">http://www.ngi.be/agn/FR/FR0.shtm</a>	1
Flandre	<b>FLEPOS</b>	<a href="http://www.agiv.be/gis/diensten/flepos/">http://www.agiv.be/gis/diensten/flepos/</a>	40
Wallonie	<b>Walcors</b>	<a href="http://gps.wallonie.be/">http://gps.wallonie.be/</a>	23

5° Ajoutons qu'il existe des systèmes payants de production et d'émission de corrections GNSS pour le monde entier (<http://www.omnistar.com/>).

## 13.5. Techniques de mesure

### 13.5.1. Mesure sur le code

1° Nous avons vu (§ 13.3.3) que les satellites émettent en continu un signal complexe, comprenant notamment un code C/A. Celui-ci est constitué d'une séquence de 1.023 bits. Ce code est également généré par le récepteur. Ce dernier pourra comparer le code C/A qu'il reçoit du satellite avec celui qu'il génère lui-même. Cette analyse lui permet d'identifier le déphasage entre le code reçu et le code généré. Ce déphasage correspond théoriquement au temps de transfert ( $\Delta t$ ) du code depuis le satellite jusqu'au récepteur. Il suffit donc de multiplier ce temps de transfert par la vitesse de la lumière pour obtenir la distance séparant le satellite  $S_i$  du récepteur situé en un point A.

$$d_{AS_i} = c\Delta t_i,$$

où  $d_{AS_i}$  est la distance séparant le satellite  $S_i$  du récepteur situé en A,  
 $c$  est la vitesse de propagation de la lumière dans le vide, soit 299 792 458 m s<sup>-1</sup>,  
 $\Delta t_i$  est le temps mis par le signal émis par le  $i^{\text{ème}}$  satellite pour se propager jusqu'au récepteur.

Cette correspondance est théorique car elle suppose que les horloges du satellite et du récepteur sont parfaitement synchronisées, ce qui n'est évidemment pas le cas. A noter que  $\Delta t_i$  peut varier entre 70 et 100 millisecondes, suivant la position des satellites. Il faut aussi noter que la vitesse réelle de propagation de l'onde dans l'atmosphère n'est pas la vitesse de la lumière dans le vide ( $c$ ) mais  $c/n$ , où  $n$  est l'indice de réfraction caractérisant le milieu traversé par l'onde. L'atmosphère traversée par l'onde va donc perturber le résultat obtenu pour la distance séparant le récepteur du satellite. Il faudra en tenir compte également dans l'évaluation de la précision du résultat obtenu (§ 13.7.1).

Cette distance, mesurée sur le code, est parfois appelée une « **pseudo-distance** » en raison de son écart par rapport à la distance réelle.

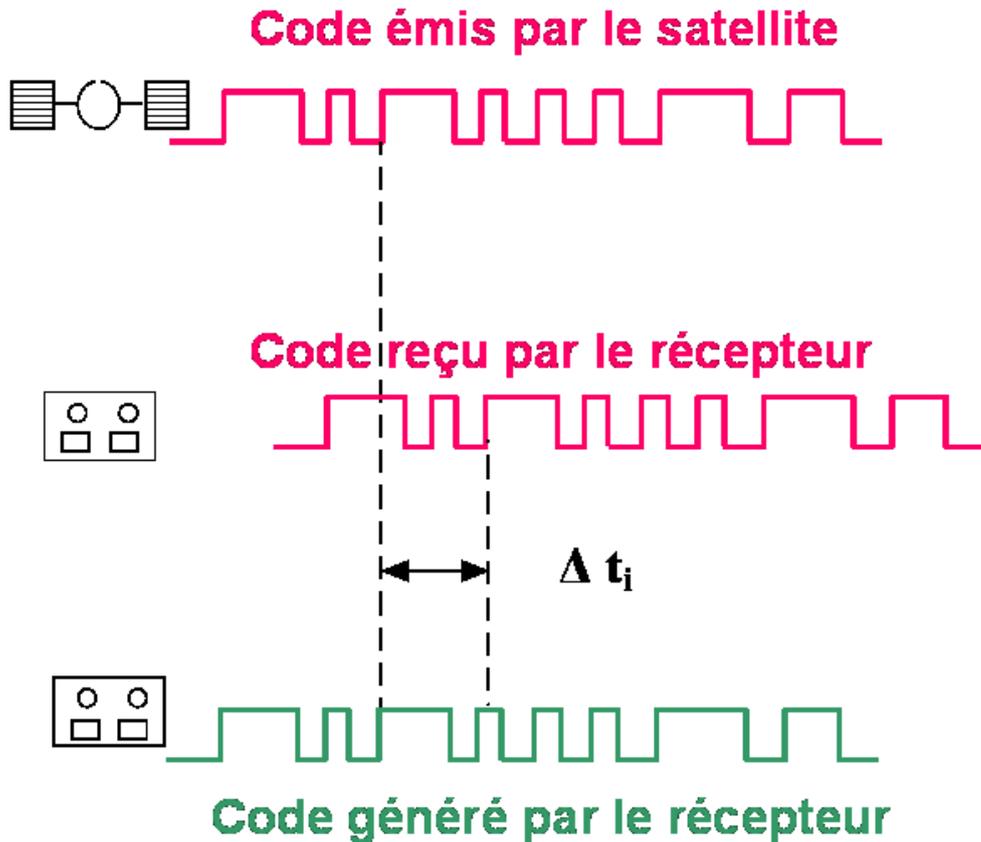


Figure 13.5.1. Illustration d'une mesure de pseudo-distance.

2° Il faut donc tenir compte de ce défaut de synchronisation parfaite des horloges des satellites et du récepteur. Pour ce faire on va procéder à l'estimation de la distance entre le satellite et le récepteur par la relation suivante :

$$\hat{d}_{AS_i} = c\hat{\Delta t}_i = c(\Delta t_i + \delta t_{S_i} - \delta t_A) = d_{AS_i} + c(\delta t_{S_i} - \delta t_A),$$

- où  $\delta t_A$  est l'écart existant entre le temps de l'horloge de l'utilisateur A et le temps GPS,  
 $\delta t_{S_i}$  est l'écart existant entre le temps de l'horloge du satellite  $S_i$  et le temps GPS,  
 $\hat{d}_{AS_i}$  est la distance estimée entre le satellite  $S_i$  et le récepteur situé en A,  
 $\hat{\Delta t}_i$  est le temps de transfert du signal du satellite au récepteur, mesuré par ce dernier.

## 13. Le système GPS

Pour être complet, on ajoute une variation de la distance estimée  $d_{\text{atm}}$  due aux perturbations que l'atmosphère crée sur la propagation du signal GPS. Cela conduit à écrire l'équation précédente sous la forme :

$$\hat{d}_{AS_i} = c\hat{\Delta}t_i = c(\Delta t_i + \delta t_{S_i} - \delta t_A) + d_{\text{atm}}.$$

3° En explicitant la distance entre le satellite et le point A par son expression en fonction des coordonnées de la position du satellite et du point A, on obtient :

$$d_{AS_i} = \sqrt{(x_{S_i} - x_A)^2 + (y_{S_i} - y_A)^2 + (z_{S_i} - z_A)^2}.$$

Cette expression comprend cinq inconnues ( $x_A$ ,  $y_A$ ,  $z_A$ ,  $\delta t_A$  et  $d_{\text{atm}}$ ), puisque les coordonnées de la position du satellite ainsi que l'erreur de temps de l'horloge de celui-ci sont connues et communiquées dans le message de navigation.

Il faut donc pouvoir recevoir les signaux de cinq satellites simultanément pour pouvoir identifier la valeur de ces cinq inconnues par solution d'un système de cinq équations (une par satellite) à cinq inconnues. En pratique, une estimation de la position du récepteur se fait déjà à partir de la réception des signaux émis par quatre satellites, en ignorant le terme  $d_{\text{atm}}$ .

4° L'estimation du temps de transfert des signaux satellitaires  $\hat{\Delta}t_i$  par le récepteur se fait en maximisant la corrélation entre le code qu'il génère et le code reçu du satellite, en fonction du décalage entre les deux. A noter cependant que le code C/A est constitué d'une séquence qui se répète toutes les millisecondes, soit environ tous les 300 km (§ 13.3.3). Il y a donc une ambiguïté correspondant à un nombre entier de millisecondes sur l'évaluation du temps de transfert. Cette ambiguïté est levée si l'utilisateur connaît très approximativement les coordonnées de la situation de son récepteur, à deux ou trois cent kilomètres près. En pratique, les récepteurs mémorisent la dernière position occupée afin de lever cette ambiguïté. Au premier usage d'un récepteur ou s'il est utilisé à plus de 300 km de son utilisation précédente, les ambiguïtés seront levées par un processus numérique particulier, fondé sur la triangulation résultant de la dispersion des satellites dans l'espace. Ce processus peut prendre quelques minutes.

### 13.5.2. Mesure sur l'onde porteuse (mesure des phases)

1° Il s'agit d'estimer la distance séparant le satellite du récepteur à partir d'une évaluation du temps de transmission du signal entre le satellite et le récepteur. Cet intervalle de temps est estimé par mesure du déphasage existant entre l'onde porteuse émise par le satellite et reçue par le récepteur d'une part, et une onde porteuse identique générée par le récepteur d'autre part.

A l'instant  $t^e$ , mesuré sur l'horloge de référence (temps GPS) marquons la phase de l'onde émise par le satellite par le symbole  $\psi_S(t^e)$ , exprimé en nombre de cycles (figure 13.5.2.).

Après un intervalle de temps  $\Delta t$ , ce signal émis par le satellite a parcouru la distance  $d_{SA}$  qui le sépare du récepteur A. Ce moment est celui de la réception du signal par le récepteur. Il est noté  $t^r$ , toujours mesuré sur la même horloge de référence. On peut évidemment écrire que :

$$t^r = t^e + \Delta t.$$

### 13. Le système GPS

Le déphasage total, exprimé en nombre de cycles, entre le signal reçu par le récepteur A et celui qui est généré par ce même récepteur peut se calculer par la relation :

$$\Delta\psi_{SA} = \psi_S(t^e) - \psi_A(t^r),$$

où  $\psi_S(t^e)$  est la phase du signal émis par le satellite S au temps  $t^e$  (exprimé en cycles),  
 $\psi_A(t^r)$  est la phase du signal généré par le récepteur A au temps  $t^r$  (exprimé en cycles),

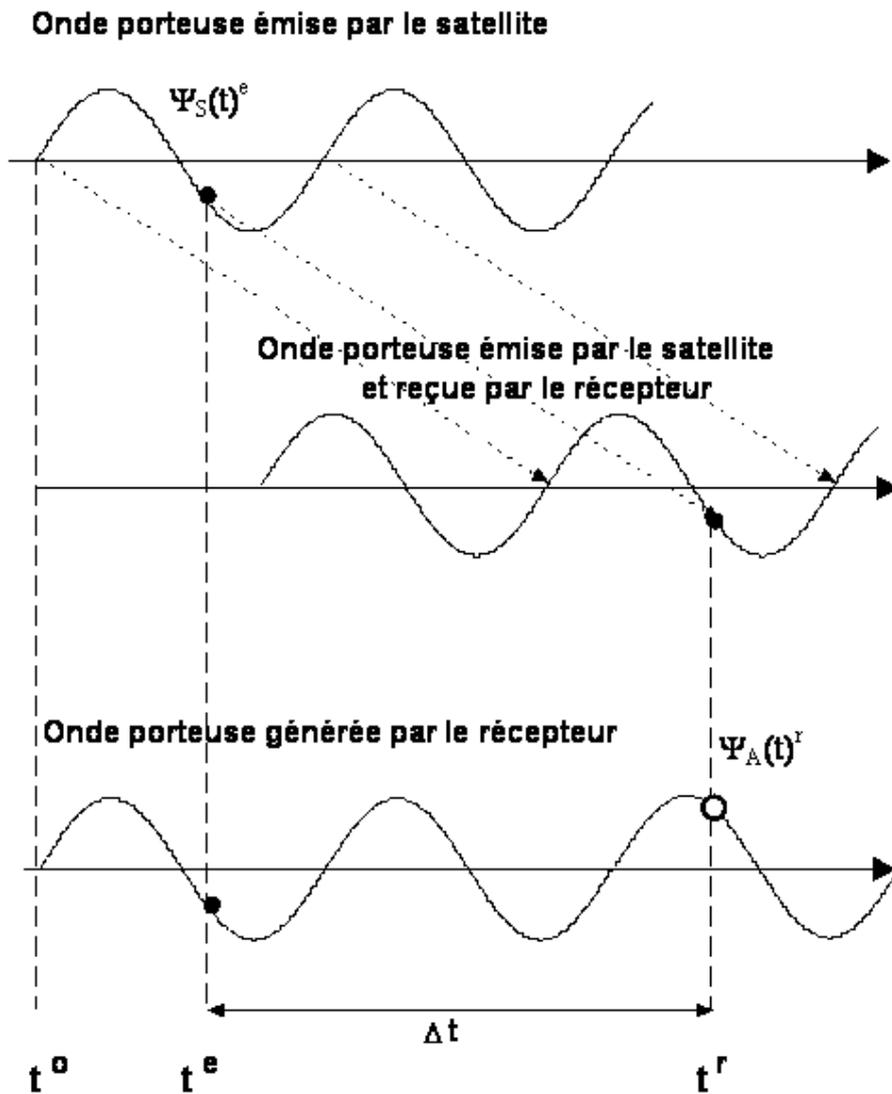


Figure 13.5.2. Illustration d'une mesure sur l'onde porteuse.

Si l'oscillateur du récepteur est parfaitement stable et comme les phases sont exprimées en nombre de cycles, on peut écrire :

$$\psi_A(t^r) = \psi_A(t^e + \Delta t) = \psi_A(t^e) + f_A \Delta t,$$

où  $f_A$  est la fréquence de l'onde porteuse générée par le récepteur.

### 13. Le système GPS

Si on admet que l'onde générée par le récepteur est parfaitement identique (en fréquence, amplitude et phase) à celle qui est émise par le satellite, on peut réécrire l'expression précédente sous la forme :

$$\psi_A(t^r) = \psi_S(t^e) + f \Delta t ,$$

ce qui permet de formuler le déphasage énoncé ci-dessus :

$$\Delta\psi_{SA} = \psi_S(t^e) - \psi_A(t^r) = \psi_S(t^e) - [\psi_S(t^e) + f \Delta t] = -f \Delta t .$$

Le raisonnement tenu jusqu'à présent suppose qu'il y a une parfaite synchronisation entre le satellite, le récepteur et le temps GPS. Il n'en est évidemment pas ainsi. Le satellite présente une erreur d'horloge notée  $\delta t_s$  qui provoque un déplacement correspondant de l'onde qu'il émet sur l'échelle du temps. De même le récepteur est caractérisé par une erreur d'horloge  $\delta t_A$ , qui affecte la position de l'onde qu'il génère sur l'échelle du temps.

En négligeant d'autres biais qui seront évoqués ultérieurement, on peut écrire la relation suivante, exprimée en variable temps :

$$t^e + \delta t_s + \frac{d_{SA}}{c} = t^r + \delta t_A ,$$

ce qui permet d'exprimer la valeur de  $\Delta t$  :

$$\Delta t = t^r - t^e = \delta t_s - \delta t_A + \frac{d_{SA}}{c}$$

et, en conséquence, de réécrire le déphasage :

$$\Delta\psi_{SA} = -f \frac{d_{SA}}{c} - f (\delta t_s - \delta t_A) .$$

2° En pratique, la mesure de ce déphasage total pose le problème suivant. Le récepteur peut mesurer la partie fractionnaire du déphasage existant entre l'onde reçue et l'onde émise ainsi que le nombre de cycles complets réalisés pendant le temps de la réception, mais pas le nombre de cycles qui se sont produits entre l'instant de l'émission du signal reçu et l'instant du début de la réception, également appelé « **ambiguïté** ».

La figure 13.5.3 illustre ces notions en utilisant les notations suivantes :

- $N_{SA}$  est le nombre inconnu de cycles complets compris dans le déphasage et qui se sont déroulés avant l'ouverture de la session de réception,
- $\Delta N_{SA}$  est le nombre mesurable de cycles complets compris dans le déphasage et qui se sont déroulés pendant la session de réception,
- $Fr(\Delta\psi_{SA})$  est la partie fractionnaire du déphasage, qui peut être mesurée par un phasemètre, dont est équipé le récepteur.

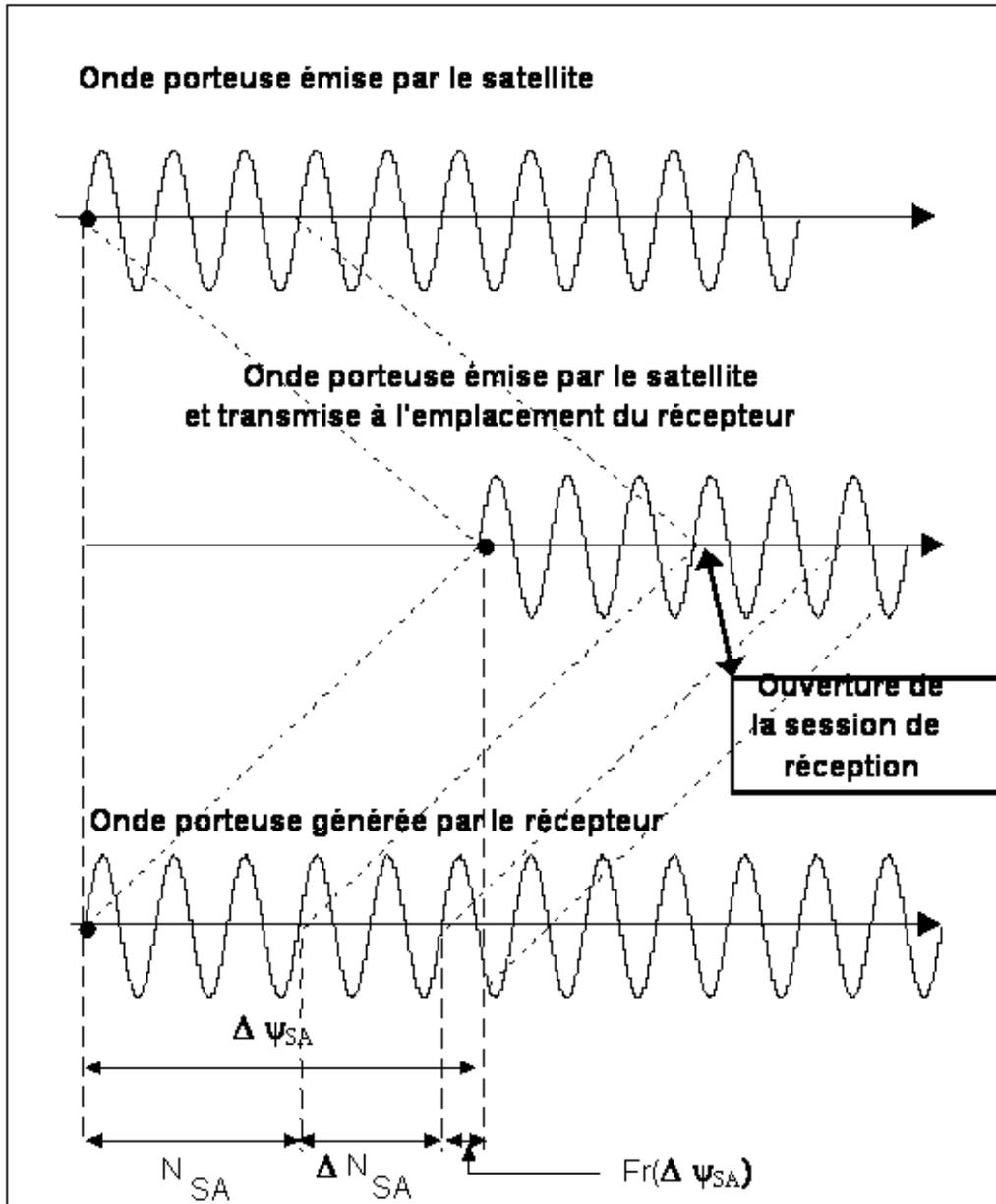


Figure 13.5.3. Illustration de la partie mesurable du déphasage et de l'ambiguïté du cycle.

On peut en conclure que le déphasage total a une composante qui peut se mesurer ( $\Delta N_{SA}$  et  $Fr(\Delta\psi_{SA})$ ) et une composante inconnue ( $N_{SA}$ ). Cela peut s'écrire :

$$\Delta\psi_{total} = \Delta\psi_{mesuré} + N_{SA}.$$

En se souvenant de l'expression définissant le déphasage total

$$\Delta\psi_{SA} = -f \frac{d_{SA}}{c} - f (\delta t_S - \delta t_A) ,$$

l'expression suivante peut s'écrire afin d'exprimer la valeur du déphasage mesuré :

$$(\Delta\psi_{SA})_{mesuré} = -f \frac{d_{SA}}{c} - f (\delta t_S - \delta t_A) - N_{SA} .$$

## 13. Le système GPS

Ce déphasage, exprimé en nombre de cycles, peut également se transformer afin d'être libellé en unité de longueur par l'expression suivante :

$$(\Delta\psi_{SA})_{\text{mesuré}} = -\lambda (\Delta\psi_{SA})_{\text{mesuré}},$$

le changement de signe étant destiné à exprimer la distance positivement et  $\lambda$  étant évidemment la longueur de l'onde porteuse. Cette transformation permet de réécrire l'expression précédente sous la forme :

$$(\Delta\psi_{SA})_{\text{mesuré}} = d_{SA} + c(\delta t_S - \delta t_A) + \lambda N_{SA}$$

en se souvenant que  $\lambda = c/f$ , où  $c$  est la vitesse de propagation de l'onde porteuse.

Cette équation est valable pour la réception par un récepteur A de l'émission d'un Satellite S à un instant donné. Elle comprend cinq inconnues que sont  $x_A$ ,  $y_A$  et  $z_A$  (compris dans  $d_{SA}$ ),  $\delta t_A$  et  $N_{SA}$ . En effet, l'erreur de temps sur l'horloge du satellite est généralement communiquée dans les informations codées reçues par le récepteur dans le message de navigation. A ces inconnues il faut encore ajouter les perturbations dans la vitesse de transmission qu'induit le passage de l'onde au travers des diverses couches de l'atmosphère. Celles-ci peuvent s'ajouter à l'équation précédente sous la forme d'une distance générée par ces perturbations atmosphériques  $d_{\text{atm}}$  :

$$(\Delta\psi_{SA})_{\text{mesuré}} = d_{SA} + c(\delta t_S - \delta t_A) + \lambda N_{SA} + d_{\text{atm}}$$

Pour identifier la valeur de ces inconnues, il convient de répéter la mesure avec différents satellites, différents récepteurs ou à différents instants.

### 13.6. Techniques de calcul

En fonction de la précision souhaitée pour le lever et vu la nécessité de répéter la mesure pour lever les inconnues figurant dans les équations vues ci-dessus, le choix sera fait entre différentes techniques de lever qui se distinguent par le nombre de récepteurs, de satellites et d'instantanés utilisés.

D'une manière générale, en raison des incertitudes qui pèsent sur la position du satellite, les horloges du satellite et des récepteurs et sur les retards de propagation, le positionnement absolu d'un point se fera toujours avec une précision de quelques mètres.

Lorsqu'une précision supérieure est requise, il faudra toujours procéder en mode relatif. En effet, les erreurs affectant le signal GPS, la position du satellite, les horloges des satellites et des récepteurs ainsi que la propagation dans l'atmosphère, présentent certaines corrélations lorsqu'elles concernent les signaux reçus par plusieurs récepteurs à un même instant. Ces corrélations sont exploitées en travaillant par différences (ou en mode différentiel) entre plusieurs signaux.

Les paragraphes suivants illustrent ces différences.

### 13.6.1. Différence simple (SD)

La différence simple (symbole  $\Delta$ ) peut se calculer entre deux instants pour un même récepteur et un même satellite ( $\Delta^t$ ), ou entre deux satellites pour un même instant et un même récepteur ( $\Delta^s$ ), ou entre deux récepteurs pour un même instant et un même satellite ( $\Delta^r$ ).

A titre d'exemple, la différence simple de mesure sur l'onde porteuse entre deux récepteurs A et B s'obtient par la différence entre les deux équations :

$$(\Delta\psi_{SA})_{\text{mesuré}} = d_{SA} + c(\delta t_S - \delta t_A) + \lambda N_{SA} + d_{\text{atm.}}$$

et

$$(\Delta\psi_{SB})_{\text{mesuré}} = d_{SB} + c(\delta t_S - \delta t_B) + \lambda N_{SB} + d_{\text{atm.}}$$

ce qui donne:

$$(\Delta\psi_{SA})_{\text{mesuré}} - (\Delta\psi_{SB})_{\text{mesuré}} = d_{SA} - d_{SB} + c(\delta t_B - \delta t_A) + \lambda(N_{SA} - N_{SB})$$

qui peut encore s'écrire de manière plus synthétique:

$$\Delta^r [(\Delta\psi_{SR})_{\text{mesuré}}] = \Delta^r d_{SR} - c\Delta^r \delta t_R + \lambda\Delta^r N_{SR}$$

où  $\Delta^r d_{SR}$  est la variation de distance entre le satellite et les deux récepteurs,  
 $\Delta^r \delta t_R$  est la différence entre les erreurs d'horloge des deux récepteurs,  
 $\Delta^r N_{SR}$  est la différence des ambiguïtés du cycle relatives aux déphasages des signaux reçus par les deux récepteurs.

On peut constater que cette différence simple permet d'éliminer les inconnues liées au satellite, c'est-à-dire l'erreur de son horloge et l'incidence de la propagation dans l'atmosphère. Cette dernière ne peut s'annuler que dans la mesure où elle peut être considérée comme identique pour les deux signaux. Cela suppose évidemment que la distance séparant les deux récepteurs est négligeable vis-à-vis de la distance qui les sépare du satellite.

### 13.6.2. Différence double (DD)

La différence double (symbole  $\Delta^s \Delta^r$ ) peut se calculer entre deux satellites et deux récepteurs ( $\Delta^s \Delta^r$ ) pour un même instant.

L'équation précédente définie pour la différence entre deux récepteurs A et B peut s'écrire pour deux satellites  $S_1$  et  $S_2$

$$\begin{aligned} & \left[ (\Delta\psi_{S_1A})_{\text{mesuré}} - (\Delta\psi_{S_1B})_{\text{mesuré}} \right] - \left[ (\Delta\psi_{S_2A})_{\text{mesuré}} - (\Delta\psi_{S_2B})_{\text{mesuré}} \right] = \\ & \left[ d_{S_1A} - d_{S_1B} \right] - \left[ d_{S_2A} - d_{S_2B} \right] + \lambda_1 (N_{S_1A} - N_{S_1B}) - \lambda_2 (N_{S_2A} - N_{S_2B}) \end{aligned}$$

En fonction des conventions d'écriture admises pour les différences, cette équation peut aussi s'écrire :

$$\Delta^s \Delta^r [(\Delta\psi_{SR})_{\text{mesuré}}] = \Delta^s \Delta^r d_{SR} + \Delta^s \lambda \Delta^r N_{SR}$$

L'influence des erreurs d'horloge des récepteurs est éliminée.

### 13.6.3. Triple différence (TD)

## 13. Le système GPS

Deux différences doubles répétées en deux instants différents donnent l'équation :

$$\begin{aligned}\Delta^t \Delta^s \Delta^r [(\Delta \psi_{SR})_{\text{mesuré}}] &= \Delta^s \Delta^r [(\Delta \psi_{SR})_{\text{mesuré}}]_{t1} - \Delta^s \Delta^r [(\Delta \psi_{SR})_{\text{mesuré}}]_{t2} \\ &= [\Delta^s \Delta^r d_{SR} + \Delta^s \lambda \Delta^r N_{SR}]_{t1} - [\Delta^s \Delta^r d_{SR} + \Delta^s \lambda \Delta^r N_{SR}]_{t2} = \Delta^t \Delta^s \Delta^r d_{SR}\end{aligned}$$

Cette triple différence permet de supprimer l'ambiguïté du cycle.

### 13.6.4. Par ajustement sur des mesures redondantes

Le plus généralement, on procède à un positionnement relatif, mettant ainsi en œuvre deux récepteurs, avec plusieurs satellites et, éventuellement, plusieurs instants successifs. Cela produit des mesures redondantes qui permettent de procéder à un ajustement. Cette redondance génère, en effet, un nombre d'équations semblables à celles qui précèdent dans les paragraphes 13.6.1 à 13.6.3, qui dépasse le nombre d'inconnues. Cette situation se prête bien à un ajustement par la méthode des moindres carrés, telle qu'exposée dans le chapitre 6<sup>7</sup>.

Il y a cependant une contrainte particulière à respecter qui est le caractère entier des ambiguïtés. Une première étape consiste à ignorer cette contrainte et à livrer une solution provisoire (parfois appelée « flottante ») dans laquelle les ambiguïtés ont des valeurs non nécessairement entières. L'issue de cette première étape produit généralement un message indiquant à l'utilisateur que le processus entame la deuxième étape. Celle-ci consiste à trouver par une technique numérique adéquate et à partir de la solution fournie à la première étape, les valeurs entières des ambiguïtés qui donneront la meilleure précision. C'est à l'issue de cette deuxième étape que les coordonnées sont affichées ainsi que leur précision.

---

<sup>7</sup> <https://hdl.handle.net/2268/293771>

### 13.7. Remarques et conclusions

Les systèmes mondiaux de positionnement par satellite (GNSS) constituent incontestablement une révolution dans l'art du positionnement. Ils présentent de très nombreux avantages sur les systèmes de positionnement terrestres « classiques » que sont par exemple les stations totales.

En matière de précision du positionnement, les récepteurs GNSS offrent une très large gamme de performance (écarts-types variant entre 1 cm et entre 10 et 100 m) et de prix (variant entre 25.000 et 250 €). Cette diversité permet de rencontrer des besoins de positionnement de diverses natures. Les plus répandus sont évidemment les besoins de navigation en voiture, avion, bateau, à pied, etc. Ils s'accommodent d'une précision de quelques mètres (métrique) et sont donc rencontrés par les récepteurs les moins coûteux. Des besoins relativement nouveaux de positionnement à quelques décimètres (précision décimétrique) sont apparus avec l'essor des systèmes d'information géographique. Ils sont rencontrés avec des récepteurs spécialement dédiés à la collecte d'information (récepteurs d'inventaire), souvent enrichis d'une assistance cartographique sur l'écran du récepteur. Finalement les besoins classiques de la topographie sont rencontrés avec les récepteurs de précision qui fournissent des coordonnées estimées avec un écart-type de l'ordre du centimètre (précision centimétrique). Le chapitre 15<sup>8</sup> permet de mieux cerner la qualité du positionnement (sa justesse et sa précision) qui peut être attendue d'un récepteur GNSS et la façon de l'évaluer.

A noter également que le mode opératoire influence aussi la précision fournie par un récepteur.

Il subsiste cependant des limites dans l'utilisation de ces récepteurs dans des environnements présentant des obstacles à la réception des signaux satellitaires comme par exemple les arbres ou les immeubles. De ce fait les stations totales sont toujours indispensables en complément du récepteur GNSS.

Il convient également de garder à l'esprit que les signaux émis par les satellites du système GPS sont captés gratuitement mais sans garantie de pérennité. Ce système appartient au Département de la Défense des États-Unis d'Amérique. Ce dernier peut à tout moment suspendre l'accessibilité à ces signaux ou les modifier pour dégrader la précision du positionnement qu'ils permettent. Cette dépendance sera corrigée dans les prochaines années par la disponibilité du système civil européen GALILEO. Ce système est décrit dans le chapitre 14.

---

<sup>8</sup> <https://hdl.handle.net/2268/301117>

## Index

- absolu (positionnement), 26
- ambiguïté, 35
- anti-Spoofing, 17
- apogée, 13
- AS**, 17
- base, 26
- beacon, 30
- C/A, 17
- calendrier julien, 11
- CCRS, 8
- code, 17
- code P, 17
- Conventional Celestial Reference System, 8
- Conventional Terrestrial Pole, 9
- Conventional Terrestrial Reference System, 9
- coordonnées**
  - rectangulaires géocentrées, 10
- correction**
  - GNSS, 26, 28
- CTP, 9
- CTRS**, 9
- datum, 10
- DGPS, 26
- DOP, 20
- Ecliptique (plan de l'), 8
- EGNOS, 29
- excentricité**
  - de l'ellipse, 14
- fixe (récepteur), 26
- FLEPOS, 30
- fréquence, 15
- Galileo, 4
- GLOBAL Navigation Satellite System, 4
- Global Positioning System, 4
- GLONASS, 4
- GNSS, 4
- GPS, 4
- GPSBru, 30
- GPST, 11
- IERS, 11
- jour**
  - julien, 11
  - julien modifié, 11
  - sidéral, 10
  - solaire, 10
- lever**
  - cinématique, 27
  - statique, 27
- ligne
  - de base, 26
- message de navigation, 17
- MJD, 11
- mobile, 26
- MSAS, 29
- NMEA, 25
- périgée, 13
- période, 15
- phase, 15
- pôle conventionnel, 9
- positionnement**
  - absolu, 26
  - relatif, 26
- post-traitement, 28
- pseudocinématique relatif (lever), 27
- pseudo-distance, 31
- rapport signal/bruit, 18
- récepteur**
  - bi-fréquence, 22
  - de navigation, 22
  - d'inventaire, 22

## 13. Le système GPS

- topographique, 22
- RINEX, 25, 26
- RTCM, 25
- RTCM SC-104, 26
- RTK, 28
- SBAS, 29
- seconde atomique, 10
- segment
  - de contrôle, 7
- segment**
  - de contrôle, 6
  - spatial, 6
- SNR, 18
- station de référence virtuelle, 28
- Stop and go, 28

- Système**
  - de Référence Conventionnel Céleste, 8
  - de Référence Conventionnel Terrestre, 9
- Système mondial de positionnement par satellites, 4
- TAI, 10
- Temps Atomique International, 10
- temps GPS, 11
- Temps Universel Coordonné, 11
- traitement différé, 28
- UTC, 11
- VRS, 28
- WAAS, 29
- Walcors, 30